

BENEDITO ANTONIO LUCIANO

**SISTEMAS DE EXCITAÇÃO E REGULAÇÃO
DE TENSÃO DE GERADORES SÍNCRONOS**

Dissertação apresentada à Coordenação dos
Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elé
trica da Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento às exigências para obten
ção do Grau de **Mestre em Engenharia Elé**
trica.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Energia

ORIENTADORES: EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA

WELLINGTON SANTOS MOTA



L937s Luciano, Benedito Antonio
Sistemas de excitacao e regulacao de tensao de geradores
sincronos / Benedito Antonio Luciano. - Campina Grande,
1984.
151 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) -
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de
Engenharia Eletrica e Informatica.

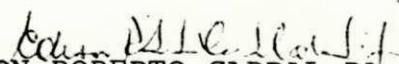
1. Geradores Sincronos 2. Dissertacao I. Silva, Edison
Roberto Cabral da, Prof. II. Mota, Wellington Santos, Prof.
III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina
Grande (PB) IV. Titulo

CDU 621.313.322(043)

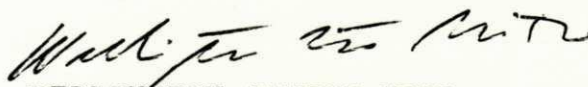
**SISTEMAS DE EXCITAÇÃO E REGULAÇÃO
DE TENSÃO DE GERADORES SÍNCRONOS**

BENEDITO ANTONIO LUCIANO

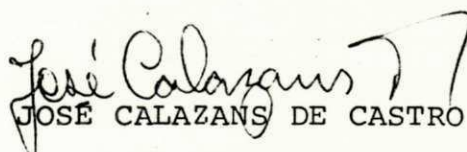
Dissertação aprovada em 16/05/84


EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA

Orientador


WELLINGTON SANTOS MOTA

Orientador


JOSÉ CALAZANS DE CASTRO

Componente da Banca


MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR

Componente da Banca

CAMPINA GRANDE

MAIO - 1984

À FRANCISCA FERNANDES LUCIANO

(In Memoriam)

AGRADECIMENTOS

Aos professores EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA e WELLINGTON SANTOS MOTA, pela orientação e incentivo na elaboração deste trabalho.

Aos professores JOSÉ CALAZANS DE CASTRO e MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, pelas críticas e apoio.

Aos colegas que, através de discussões sobre o trabalho, contribuíram no seu desenvolvimento, entre eles: MARIA DA GUIA DA SILVA, ANTONIO DO NASCIMENTO EPAMINONDAS e ANGELA MARIA DA SILVEIRA.

A ROSEANA BEZERRA LUCIANO, ÉRIKA e PABLO pelas horas subtraídas do convívio afetivo.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre sistemas de excitação de geradores síncronos. Partindo-se de um esquema geral de um sistema de controle da excitação de um gerador síncrono, apresentado em diagrama de bloco, discute-se o desempenho de cada parte que o constitui. Após uma análise individual de cada bloco, apresenta-se o modelo completo do sistema, com o objetivo de estabelecer e comparar os modelos básicos utilizados, classicamente, para representar sistemas de excitação em estudos de estabilidade de sistema de potência. Baseando-se na teoria de controle clássico, um sinal estabilizador derivado de velocidade de máquina é projetado para melhorar o desempenho dinâmico de um sistema de potência via regulador de tensão/sistema de excitação. O projeto é baseado em um modelo linearizado de um sistema de potência, caracterizado por uma máquina, com sistema de excitação estático, ligado a uma barra infinita através de uma impedância equivalente.

ABSTRACT

In this dissertation a study on excitation systems of synchronous generators is presented, starting with the description of a general excitation control system scheme and its major constituent parts. After an analysis of individual blocks the whole system including the synchronous generator is analysed in order to establish and compare the existent classical models, used to represent excitation systems in the power system stability studies. A stabilizing signal, derived from the machine velocity, is designed to improve the dynamic performance of the power system, employing a voltage regulator and an excitation system. This design is done by simulation on a digital computer, using classical control theory concepts and is based on linearized model of the power system made of a machine and a static excitation system connected to an infinite bus through an equivalent impedance.

LISTA DE SÍMBOLOS

A_s	Constante introduzida na representação exponencial da saturação magnética da máquina síncrona
a	Constante que relaciona as constantes de tempo do compensador dinâmico
B_s	Constante introduzida na representação exponencial da saturação magnética da máquina síncrona
D	Eixo de referência
d	Eixo direto
E_a	Tensão de entrada do amplificador
E_{fd}	Tensão de campo da máquina síncrona
E_I	Tensão proporcional à corrente de campo em pu
e'	Fasor da tensão atrás da reatância transitória

e_{fd}	Tensão de campo da máquina síncrona em pu
$e_{q'}$	Componente no eixo de quadratura da tensão <u>a</u> trás da reatância transitória
F	Tensão de saída do bloco de estabilização tran <u>s</u> sitória
F_{ex}	Fator de carga do retificador
f	Frequência
g	Aceleração da gravidade
H	Constante de inércia da máquina síncrona
I_{FD}	Corrente de campo do gerador
I_N	Corrente de carga da excitatriz normalizada
i_d	Componente do eixo direto da corrente terminal
i_q	Componente do eixo de quadratura da <u>corrente</u> terminal
i_t	Corrente terminal

K_A	Ganho estático do amplificador
K_B	Ganho estático do regulador
K_E	Fator de carga do retificador relativo à reatância de comutação
K_D	Fator desmagnetizante, função das reatâncias da excitatriz do gerador
K_d	Fator de amortecimento
K_E	Ganho estático da excitatriz rotativa
K_F, K_N	Ganhos do estabilizador do sistema de controle da excitação
K_L	Ganho da corrente limite do campo da excitatriz
K_{LV}	Ganho do sinal limite de baixa tensão da excitatriz
K_p	Coefficiente do ganho do circuito de potência
K_R	Constante de proporcionalidade
K_q	Ganho do ESP

K_V	Constante de ajuste do contato superior/ inferior do reostato
P	Número de polos da máquina síncrona
P_{ac}	Potência acelerante
P_g	Potência ativa do gerador
P_m	Potência mecânica
P_e	Potência elétrica
Q_g	Potência reativa do gerador
R_{eg}	Resistência equivalente do sistema de potência
S	Potência aparente
S_E	Função saturação de excitatriz, $S_E = f(Efd)$
T	Torque líquido no rotor da máquina síncrona
T_A, T_B, T_C	Constante de tempo do regulador de tensão
T_E	Constante de tempo da excitatriz rotativa

T_{do}	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto
T_e	Torque eletromagnético
T_F	Constante de tempo referente à realimentação transitória do regulador de tensão do sistema de excitação tipo CCl
T_m	Torque mecânico
T_q	Constante de tempo do bloco "wash-out" do ESP
T_R	Constante de tempo do bloco retificador/filtro
T_{RH}	Tempo de atuação do reostato
T_{sen}	Constante de tempo do filtro na medição
V_A	Tensão interna do regulador
V_B	Tensão da barra infinita
V_c	Tensão de saída do compensador
V_c	Tensão de controle

V_d	Componente da tensão do estator no eixo direto (pu)
V_E	Tensão da excitatriz atrás da reatância de <u>co</u> mutação
V_{ERR}	Sinal de erro da tensão
V_e	Tensão do campo da excitatriz
V_F	Sinal estabilizante do sistema de excitação
V_{FE}	Sinal proporcional à corrente de campo da exci <u>ta</u> tatriz
V_G	Realimentação da tensão no laço interno
V_H, V_L	Sinais de realimentação da corrente de campo da excitatriz
V_I	Sinal interno do regulador de tensão
V_{LV}	Limite de referência de baixa tensão da exci <u>ta</u> tatriz
V_q	Componente da tensão do estator no eixo de qua <u>dratura</u>

V_R	Tensão de saída do regulador
V_{REF}	Tensão de referência do regulador de tensão
V_T, V_t	Tensão terminal do gerador
V_{RH}	Ajuste do reostato do campo
V_S	Tensão de saída do estabilizador do sistema de potência
X_d	Reatância síncrona de eixo direto
X_d'	Reatância transitória de eixo direto
X_p	Reatância saturada da máquina
ω_o	Velocidade angular nominal
Z_{eq}	Impedância equivalente
α	Ângulo de gatilhamento
ΔE_I	Correção de E_I devido à saturação (pu)
δ	Ângulo de torque ou ângulo do rotor
θ_e	Ângulo elétrico

θ_m

Ângulo mecânico

θ_p

Ângulo de fase do circuito de potência

ϕ

Fator de potência

$\dot{\omega}$

Aceleração angular mecânica

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
FIGURA II.1 - Excitatriz CC.....	10
FIGURA II.2 - Excitatriz CA com retificadores não controlados.....	11
FIGURA II.3 - Excitatriz CA com retificadores não controlados rotativos (sem escovas)...	12
FIGURA II.4 - Excitatriz CA com retificadores controlados (com escovas).....	13
FIGURA II.5 - Excitatriz CA com retificadores controlados rotativos (sem escovas).....	14
FIGURA II.6 - Auto-excitação direta a tiristores....	15
FIGURA II.7 - Auto-excitação direta com "compound"..	16
FIGURA II.8 - "Compound em paralelo".....	17
FIGURA II.9 - "Compound série".....	19
FIGURA II.10 - Componentes de um sistema de excitação.....	20

	PÁGINA
FIGURA II.11 - Excitatriz CC excitada separadamente..	21
FIGURA II.12 - Curva de saturação da excitatriz em carga.....	22
FIGURA II.13 - Excitatriz CC excitada separadamente (modelo).....	24
FIGURA II.14 - Diagrama de blocos da excitatriz CC...	24
FIGURA II.15 - Relação tensão retificada e ângulo de disparo.....	29
FIGURA II.16 - Relação tensão retificada e tensão de controle.....	29
FIGURA II.17 - Circuito de desexcitação através de um resistor.....	33
FIGURA II.18 - Circuito de desexcitação através de um diodo em série com um resistor.....	33
FIGURA II.19 - Circuito de desexcitação através de um tiristor em série com um resistor.....	34
FIGURA II.20 - Circuito supressor de sobretensões a través dos tiristores T_1 e T_2	35

FIGURA II.21 - Diagrama de blocos do sistema de controle da excitação.....	37
FIGURA II.22 - Amplificador magnético.....	40
FIGURA II.23 - Controle do gatilho com relação linear entre V_c e α	41
FIGURA II.24 - Controle do gatilho com relação linear entre V_e e V_c	42
FIGURA II.25 - Diagrama de princípio do regulador de uma excitatriz CA.....	43
FIGURA II.26 - Diagrama do elemento detetor (TP), ponte retificadora e filtro.....	44
FIGURA II.27 - Circuito amplificador.....	45
FIGURA II.28 - Compensação de corrente ativa e reativa.....	47
FIGURA II.29 - Compensador de corrente reativa.....	49
FIGURA II.30 - Compensador de corrente reativa com medição nas três fases.....	49
FIGURA II.31 - Compensador em avanço.....	50

	PÁGINA
FIGURA II.32 - Compensador em avanço-atraso.....	50
FIGURA II.33 - Diagrama de potência e corrente de um turbo-gerador.....	52
FIGURA II.34 - Diagrama de blocos do circuito do sistema de regulação de tensão de um gerador síncrono adicionado dos limitadores.....	57
FIGURA II.35 - Diagrama de blocos de um ESP típico...	57
FIGURA II.36 - Diagrama de blocos do sistema de controle da excitatriz (CA).....	60
FIGURA II.37 - Diagrama de blocos de um sistema de excitação incluindo o ESP.....	62
FIGURA III.1 - Sistemas de excitação tipo 1, regulador de ação contínua e excitatriz....	68
FIGURA III.2 - Sistema de excitação tipo 2, sistema de retificador rotativo.....	70
FIGURA III.3 - Sistema de excitação tipo 3, sistema estático com alimentação de tensão e corrente terminais.....	72

	PÁGINA
FIGURA III.4 - Sistema de excitação tipo 4, regula dor de ação não-contínua.....	74
FIGURA III.5 - Sistema de excitação estático HITACHI	75
FIGURA III.6 - Sistema de excitação estático BBC ti po UNITROL.....	76
FIGURA III.7 - Características dinâmicas do sistema de excitação.....	80
FIGURA III.8 - Representação do sistema tipo 1-IEEE.	80
FIGURA III.9 - Sistema de excitação a tiristor ASEA.	81
FIGURA III.10 - Diagrama de blocos do modelo do siste ma de excitação tipo CC1. Excitatriz CC com comutador.....	83
FIGURA III.11 - Tipo CC2 - Excitatriz CC com comuta dor.....	84
FIGURA III.12 - Tipo CC3 - Excitatriz rotativa com reguladores de ação não-contínua.....	85
FIGURA III.13 - Tipo CA1 - Sistema de excitação alter nador-retificador com retificadores não-controláveis e realimentação a partir de corrente de campo da excita triz.....	87

FIGURA III.14 - Tipo CA2 - Sistema de excitação al ternador-retificador, de alta respos ta inicial com retificadores não- con troláveis e realimentação a partir da corrente de campo da excitatriz.....	88
FIGURA III.15 - Tipo CA3 - Excitatriz alternador-reti ficador.....	90
FIGURA III.16 - Tipo CA4 - Excitatriz alternador-reti ficador controlado.....	90
FIGURA III.17 - Tipo ST1 - Excitatriz estática com retificador controlado como fonte de potência.....	92
FIGURA III.18 - Tipo ST2 - Alimentação "compound" da excitatriz através de retificadores..	93
FIGURA III.19 - Tipo ST3 - Excitatriz com fonte de a limentação "compound" através de reti cadores controlados.....	95
FIGURA IV.1 - Diagrama de blocos de um sistema de excitação com excitatriz rotativa....	104
FIGURA IV.2 - Diagrama de blocos de um sistema de excitação com excitatriz estática....	106

FIGURA IV.3	- Diagrama vetorial em regime permanente.....	109
FIGURA IV.4	- Diagrama de blocos do sinal estabilizador derivado da velocidade da máquina.....	114
FIGURA IV.5	- Representação aproximada da máquina/sistema de excitação.....	114
FIGURA IV.6	- Diagrama unifilar do sistema utilizado para a simulação digital.....	117
FIGURA IV.7	- Diagrama de bloco simplificado do sistema de excitação estático.....	120
FIGURA IV.8	- Sistema genérico de duas barras ligadas através de uma impedância Z_{eq}	120
FIGURA IV.9	- Máquina ligada a uma barra infinita através de uma impedância equivalente.....	121
FIGURA IV.10	- Curto-circuito trifásico equilibrado na barra 1 durante 0,1s, sem nenhum sinal estabilizador implementado (ângulo de torque).....	124

FIGURA IV.11 - Curto-circuito trifásico equilibrado na barra 1 durante 0,1 s, com sinal estabilizador implantado na máquina 1 (ângulo de torque).....	125
FIGURA IV.12 - Curto-circuito trifásico equilibrado na barra 1 durante 0,1 s, sem nenhum sinal estabilizador implementado (tensão de campo).....	126
FIGURA IV.13 - Curto-circuito trifásico equilibrado na barra 1 durante 0,1 s, com sinal estabilizador implantado na máquina 1 (tensão de campo).....	127
FIGURA A.1 - Definição da razão de resposta da tensão.....	131
FIGURA C.1 - Posição angular do rotor com relação ao eixo rotativo em sincronismo.	136

CONTEÚDO

I	PÁGINA
INTRODUÇÃO	01
I.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	01
I.2 REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES.....	03
I.3 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	06
II	
CONTROLE DA EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS.....	08
II.1 INTRODUÇÃO.....	08
II.2 SISTEMAS DE CONTROLE DA EXCITAÇÃO.....	09
II.2.1 COM EXCITATRIZ ROTATIVA.....	09
II.2.2 COM EXCITATRIZ ESTÁTICA.....	09
II.3 COMPONENTES DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO.....	19
II.3.1 A EXCITATRIZ.....	20
II.3.2 PONTES RETIFICADORAS.....	27
II.3.3 SISTEMA AUXILIAR DE PARTIDA E CONTROLE MA NUAL.....	30
II.3.4 SISTEMAS DE PROTEÇÃO.....	31
II.3.5 REGULADOR DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	35

	PÁGINA
II.3.5.1 AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA.....	39
II.3.5.2 O REGULADOR PRIMÁRIO.....	43
II.3.5.3 ELEMENTOS ADICIONAIS.....	46
II.4 DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA DE EXCI TAÇÃO.....	62
II.5 CONCLUSÃO.....	64
 III	
MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍN CRONOS	65
III.1 INTRODUÇÃO.....	65
III.2 TIPOS BÁSICOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO..	66
III.2.1 SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 1.....	67
III.2.2 SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 2.....	70
III.2.3 SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 3.....	71
III.2.4 SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 4.....	73
III.2.5 CONSIDERAÇÕES.....	74
III.3 NOVOS MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO..	81
III.3.1 TIPO CC - SISTEMAS COM EXCITATRIZES ROTA TIVAS DE CORRENTE CONTÍNUA COM COMUTADOR.....	82

	PÁGINA
III.3.2 TIPO CA - SISTEMAS DE EXCITAÇÃO COM ALI MENTAÇÃO ATRAVÉS DE ALTERNA DOR E RETIFICADOR.....	86
III.3.3 TIPO ST - SISTEMAS DE EXCITAÇÃO ESTÁTI COS.....	91
III.4 CONCLUSÃO.....	95
 IV	
EFEITO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO SOBRE O COMPORTA MENTO DINÂMICO DO GERADOR SÍNCRONO-ESTUDO DA ES TABILIDADE	97
IV.1 INTRODUÇÃO.....	97
IV.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA.....	98
IV.3 O ESTUDO DA ESTABILIDADE.....	99
IV.4 COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA.....	100
IV.4.1 SIMULAÇÃO DINÂMICA DO MODELO DO SISTEMA DE POTÊNCIA-MODELO DA MÁQUINA.....	101
IV.4.2 MODELOS PARA SIMULAÇÃO DINÂMICA DE REGU LADORES DE TENSÃO E SISTEMAS DE EXCITA ÇÃO.....	103
IV.4.3 CONDIÇÕES INICIAIS PARA A SIMULAÇÃO.....	108

	PÁGINA
IV.4.4 EFEITOS DOS SINAIS ESTABILIZADORES.....	110
IV.5 PROJETO DE UM SINAL ESTABILIZADOR CONVEN CIONAL DERIVADO DA VELOCIDADE DA MÁQUINA/ BARPA INFINITA.....	112
IV.6 SISTEMA UTILIZADO NA SIMULAÇÃO.....	116
IV.7 IMPLEMENTAÇÃO DO SINAL ESTABILIZADOR....	121
IV.8 CONCLUSÃO.....	122
 V	
CONCLUSÕES	128
APÊNDICE A - RAZÃO DE RESPOSTA DA TENSÃO DO SIS TEMA DE EXCITAÇÃO.....	131
APÊNDICE B - GRANDEZAS E PONTOS TÉCNICOS QUE DE VEM SER CONSIDERADOS NO PROJETO DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO E REGULA ÇÃO.....	133
APÊNDICE C - EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO.....	135
APÊNDICE D - DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA EQUIVA LENTE PARA UM SISTEMA DE DUAS BAR RAS.....	141

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

A crescente necessidade de blocos cada vez maiores de energia elétrica, levou ao crescimento das potências individuais dos geradores síncronos e conseqüentemente maiores potências de excitação tornaram-se necessárias. Com isso, sistemas elétricos clássicos de excitação (excitatrizes rotativas) tornaram-se obsoletos, dando lugar a sistemas de excitação estático de alta velocidade de resposta. Também os reguladores de tensão passaram a ser de ação rápida diminuindo o tempo de desequilíbrio entre a carga e a geração. Infelizmente esses reguladores rápidos de altos ganhos prejudicam o amortecimento natural das máquinas podendo ocorrer instabilidade em oscilações seguintes à primeira [06]. Nesta situação é muito importante o uso de sinais estabilizadores através dos reguladores de tensão [01] .

O desenvolvimento de reguladores de tensão automáticos tornou possível o aumento das reatâncias dos geradores, boa regulação de tensão local e redução da potência de sincronismo [15] . Com o aumento da capacidade de potência da

máquina síncrona e o uso de altas tensões de transmissão a longa distância em sistemas de potência, o aspecto da estabilidade passou a assumir importância relevante e seu controle através do sistema de excitação das máquinas síncronas uma necessidade.

O desempenho dos geradores e seus sistemas de excitação diante de pequenas perturbações (Estabilidade Dinâmica) ou grandes perturbações (Estabilidade Transitória) pode ser verificado através de ensaios ou simulação através de programas em computador digital, que permitam representar a máquina e seu sistema de controle.

Ultimamente, sinais estabilizadores convencionais derivados da velocidade ou da potência da máquina, têm sido usados para melhorar o comportamento transitório e dinâmico de sistemas de potência através do controle da excitação.

O Capítulo II apresenta um estudo sobre os reguladores de tensão e sistemas de controle da excitação de geradores síncronos, desde os primitivos de ação direta e resposta lenta, até os atuais reguladores automáticos de tensão e sistemas de controle de excitação estáticos de alta velocidade de resposta.

O Capítulo III apresenta, a partir do estudo feito no Capítulo II, modelos de sistemas de excitação de geradores síncronos classificados de acordo com a fonte de alimentação da excitatriz. Esses modelos são bastante úteis no estudo da estabilidade dos sistemas de potência.

No Capítulo IV o projeto de um sinal estabilizador e seu efeito sobre o ângulo de carga e tensão de campo de um gerador síncrono é apresentado. O modelo utilizado no estudo consiste de uma máquina conectada a uma barra infinita através de uma impedância equivalente.

I.2 REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES

Dependendo do tipo de excitatriz, o sistema de excitação de geradores síncronos pode ser classificado como: eletromecânico ou eletrônico [05]. O gerador de corrente contínua no sistema de excitação eletromecânico pode ser auto-excitado ou excitado em separado. O projeto de excitatrizes de corrente contínua de grande capacidade apresentou sérios problemas de comutação, e a experiência mostrou que a manutenção de comutadores e escovas apresentavam sérios problemas quando essas excitatrizes entravam em serviço [17]. Ultimamente sistemas de excitação de rápida resposta inicial têm sido utilizados, principalmente em hidrogeradores, onde a vantagem da ausência de comutadores, coletores e escovas é observada, além do fato de a velocidade de resposta ser tão rápida quanto a de uma excitatriz eletrônica [20]. Na prática, tem-se verificado que sinais estabilizantes derivados da velocidade da máquina em conjunto com o sistema de excitação estática de alta velocidade de resposta, aumentam os limites de estabilidade do gerador [01, 06, 14].

O regulador de tensão é o "cérebro" do sistema de excitação. Controla a saída da excitatriz, de modo que a tensão e a potência reativa na saída do gerador estejam na faixa desejada. Nos sistemas primitivos os reguladores de tensão eram inteiramente manuais. Nos atuais sistemas, o regulador de tensão é um controlador que detecta a tensão de saída do gerador (e algumas vezes a corrente) e então inicia a ação corretiva através de mudanças nos controles da excitação. A velocidade de resposta desse dispositivo é de grande importância no estudo da estabilidade da máquina síncrona [01, 02, 04, 11] .

Reguladores automáticos de tensão têm sido largamente utilizados, em grandes alternadores, onde a potência envolvida pode ser de centenas de megawatts, e em pequenos geradores utilizados para fornecer apenas poucos watts [04].

Estudos detalhados do efeito do regulador de tensão sobre a estabilidade de um alternador conectado através de uma reatância a uma barra infinita têm sido realizados. Na realização desses estudos, modelos matemáticos do sistema de controle da excitação da máquina síncrona são desenvolvidos, com o objetivo de se tornarem adequados para representar o processo em estudo [01, 06, 10, 11] . Dependendo do problema a ser resolvido, o modelo pode ser linear (análise, projeto) ou não linear (simulação dinâmica). Por outro lado, os métodos de soluções podem ser através de: variáveis de estado, funções de transferência, diagrama de blocos, etc. [01, 03, 05] .

Vários estudos foram realizados sobre a interação da máquina síncrona e seu sistema de excitação, e uma das conclusões obtidas através desses estudos foi que essa interação afeta diretamente as simplificações que possam ser feitas na representação da máquina síncrona [22]. Baseado nos tipos de sistemas de excitação que prevaleceram durante certo período, uma representação clássica para a máquina síncrona foi desenvolvida [01]. Ultimamente, mudanças marcantes têm ocorrido tanto na natureza quanto nas características dos sistemas de excitação aplicados às máquinas síncronas [07]. O resultado é que a representação clássica da máquina não mais se adequa à análise de estabilidade e novos modelos, alguns simplificados, têm sido apresentados [22].

A maioria dos problemas que envolvem o comportamento dos sistemas de excitação, requer o uso de computadores digitais. Logo, modelos adequados para representar esses sistemas tornou-se necessário [08].

Sistemas de excitação de resposta rápida têm melhorado os limites de estabilidade transitória na primeira oscilação do ângulo do rotor das máquinas síncronas; entretanto, excitatrizes rápidas geralmente introduzem um torque de amortecimento negativo [06]. Então, vários métodos têm sido propostos para melhorar a estabilidade da máquina síncrona [06, 10, 11] e várias aproximações usando teoria de controle clássico têm sido sugeridas para analisar o efeito do regulador de tensão na estabilidade do sistema de potência [28].

Sinais estabilizadores têm sido utilizados para me

lhorar o desempenho dinâmico de sistemas de potência [25, 26]. Um sinal estabilizador oriundo do desvio de velocidade do eixo da máquina tem oferecido efetivo aumento no amortecimento das oscilações da máquina e melhorado a estabilidade de sistemas de potência após o período transitório inicial a uma perturbação. Esse fato tem sido observado através de estudos em computador digital para sistemas de potência multi- máquina reais em operação, tanto pela aplicação de controle clássico, quanto através de uma estratégia de controle ótimo [24, 25].

I.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho objetiva apresentar um estudo sobre sistemas de controle da excitação de geradores síncronos, desde os mais antigos até os atuais sistemas de excitação a estado sólido, considerando os equipamentos e dispositivos que os constituem. A partir da análise funcional de cada componente de um sistema de controle de excitação genérico, e do conhecimento de sua função de transferência, pretende -se mostrar como estabelecer um modelo linearizado do mesmo e comparar modelos apresentados na literatura entre si e com relação a alguns outros desenvolvidos por fabricantes.

Objetiva, também, ilustrar os ajustes dos parâmetros de um estabilizador do sistema de potência, sua simulação em computador digital, assim como o efeito de um sinal estabilizador, derivado da velocidade, no amortecimento da reses

posta angular da máquina, através de um sistema de excitação estático.

CAPÍTULO II

CONTROLE DA EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

II.1 INTRODUÇÃO

Dentre os principais controles que afetam um gerador síncrono está o controle de sua excitação, onde três componentes principais podem ser destacados: a excitatriz, o controle auxiliar e o regulador de tensão.

Em vários sistemas de excitação, ainda hoje em uso, a excitatriz é um gerador de corrente contínua. No entanto, esse tipo de excitatriz está obsoleto.

Com o advento da tecnologia do estado-sólido e a possibilidade de realização de retificadores de altas correntes, sistemas com retificadores, controlados ou não, tornaram-se possíveis e a excitatriz CC tem dado lugar às excitatrizes CA com retificadores ou a excitatrizes totalmente estáticas alimentadas a partir dos terminais do gerador síncrono, com a vantagem da utilização de altas correntes para alimentar o campo do gerador e praticamente eliminar o atraso causado pela constante de tempo referente à excitatriz rotativa.

A regulação de tensão através do sistema de controle de excitação do gerador síncrono é de fundamental importância para o desempenho desse gerador, quando interligado ao sistema de potência.

Este Capítulo apresenta e discute um sistema de controle da excitação de um gerador síncrono, a partir de suas partes constituintes, formando a base para o estabelecimento de modelos de sistemas de excitação.

II.2 SISTEMAS DE CONTROLE DA EXCITAÇÃO

Por definição, o sistema de controle da excitação é um sistema de controle com realimentação que inclui, além da máquina síncrona, seu sistema de excitação [09] .

De uma forma geral os sistemas de excitação podem ser classificados, quanto à excitatriz, da seguinte forma [14] :

II.2.1 - Com Excitatriz Rotativa

- a) Corrente contínua (CC)
- b) Corrente alternada (CA)

II.2.2 - Com Excitatriz Estática

- a) Excitatriz a tiristores: alimentação direta dos terminais do gerador
- b) Excitatriz "Compound" (diodo ou tiristores): independente, paralelo e série.

As figuras II.1, II.2, II.3, II.4 e II.5 mostram os circuitos básicos de excitatrizes rotativas, apresentados em diagrams simplificados, enquanto que as figuras II.6, II.7, II.8 e II.9 mostram excitatrizes a estado sólido.

1a) Com excitatriz rotativa CC

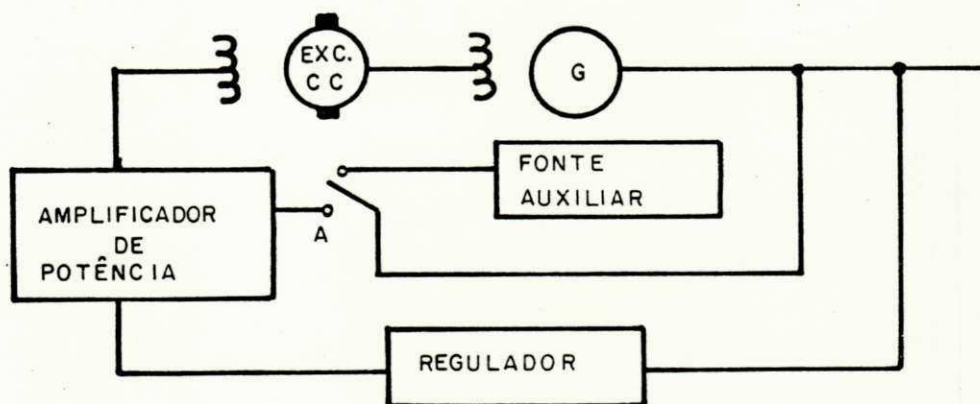


Fig. II.1 - Excitatriz CC

A excitatriz de corrente contínua geralmente está diretamente acoplada ao eixo do gerador síncrono, podendo ser auto-excitada, excitada em separado ou do tipo "Shunt" com dois enrolamentos auxiliares constituindo um conjunto "shunt-separado". Esses enrolamentos auxiliares denominados, "boost" e "buck" têm dupla finalidade, que são: manter estável a tensão de saída da excitatriz, quando em regime permanente, e deslocar o ponto de operação para um novo valor, quando assim for imposto pelo regulador de tensão. Análise do desempenho desses tipos de excitatrizes são apresentadas na literatu

ra [01 , 02].

lb) Com excitatriz rotativa CA

A excitatriz de corrente alternada, a exemplo da excitatriz de corrente contínua, também está geralmente acoplada ao próprio eixo do gerador. Como o campo do gerador síncron precisa ser alimentado por corrente contínua, a tensão CA da excitatriz precisa ser retificada. Essa retificação pode ser feita através de diodos (retificadores não controlados) ou tiristores (retificadores controlados).

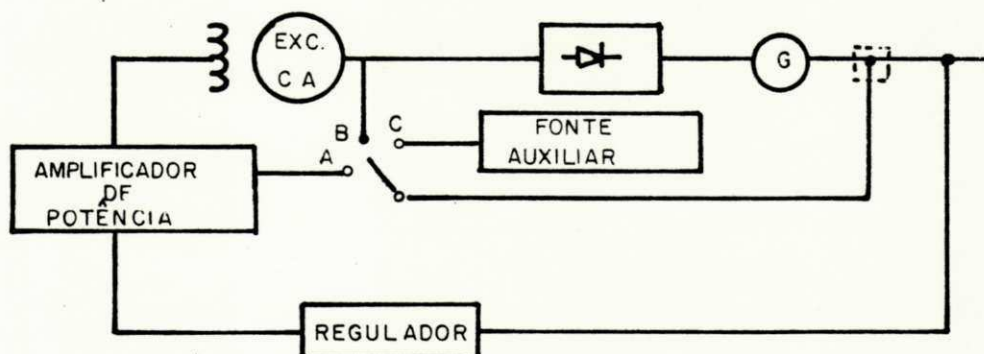


Fig. II.2 - Excitatriz CA com retificadores não controlados

A figura II.2 mostra o diagrama de um sistema de excitação com excitatriz CA com retificadores a diodo estacionários. No entanto, a excitatriz CA e os retificadores podem fazer parte de um único conjunto de elementos rotativos, caracterizando um sistema sem escovas, isto é, o uso de anéis coletores é dispensável desde que gerador-excitatriz e diodos retificadores girem no mesmo eixo. O sistema incorpora um gerador de imã permanente (GIP) com um campo magnético per

manente para alimentar o campo (estacionário) da excitatriz CA (rotativa). Portanto, sendo todo acoplamento entre os componentes estacionários e rotativo de natureza eletromagnética, torna-se impossível medir diretamente qualquer quantidade de campo do gerador, desde que todos os componentes estão se movendo juntamente com o rotor e nenhum anel coletor é utilizado. A Fig. II.3 mostra em diagrama de blocos um sistema com excitatriz CA e retificadores rotativos.

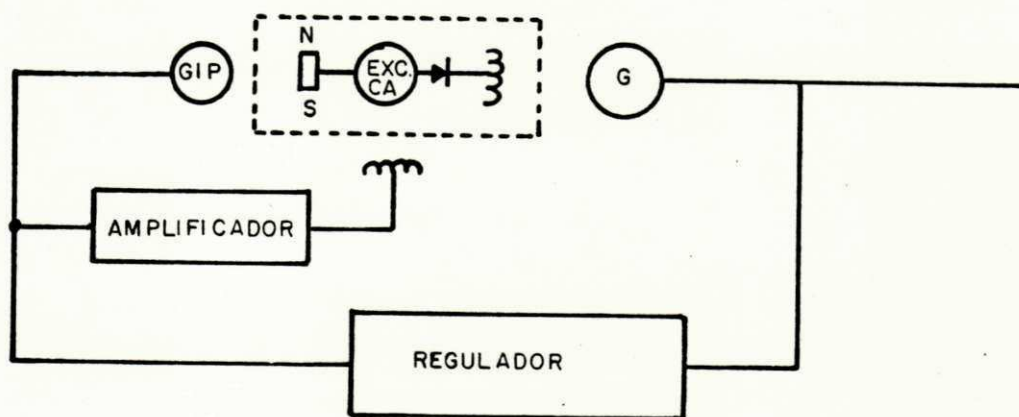


Fig. II.3 - Excitatriz CA com retificadores não controlados rotativos (sem escovas)

Conforme foi dito anteriormente, a retificação da tensão alternada da excitatriz CA pode ser feita também através de retificadores controlados. A Fig. II.4 mostra este tipo de sistema de excitação, onde a saída da excitatriz é diretamente controlada por um retificador a tiristores e aplicada ao campo do gerador. A excitatriz pode ser auto-excitada, como mostrada na figura anterior [23], ou por uma excitatriz piloto auxiliar. No caso de auto-excitação o campo da excitatriz é alimentado a partir de duas fontes, redundantes, para

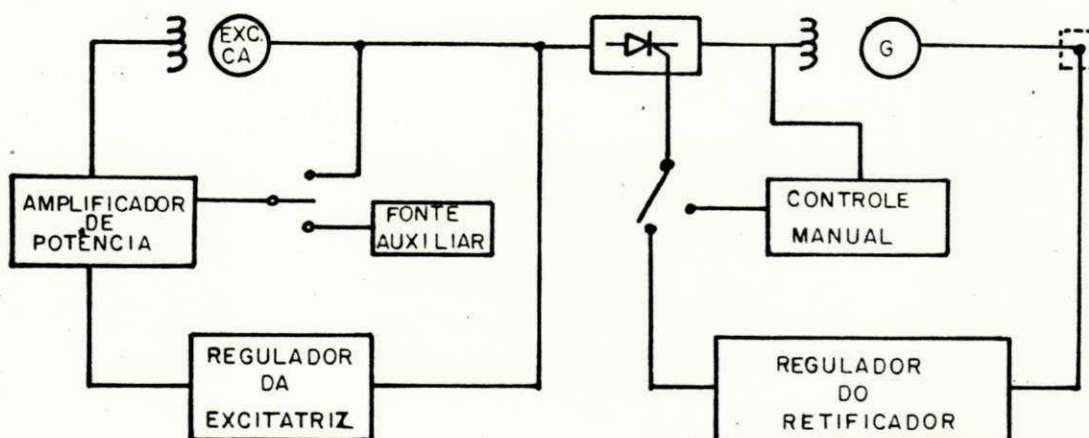


Fig. II.4 - Excitatriz CA com retificadores controlados (com escovas)

lelas, cada uma incluindo uma ponte trifásica a tiristores.

O regulador da excitatriz CA normalmente está em operação para manter uma tensão constante para as pontes a tiristores do gerador. O regulador do retificador controla a tensão de campo do gerador e o controle manual, que mantém a tensão do campo do gerador, é utilizado durante a partida ou quando o regulador principal não está em operação.

A exemplo da excitatriz CA com retificadores não controlados rotativos, existe também a excitatriz CA com retificadores controlados rotativos (sem escovas). Um esquema desse tipo de excitatriz é apresentado na Fig. II.5, onde a parte girante do sistema é apresentada envolvida por linhas pontilhadas. A excitatriz e a ponte retificadora a tiristores estão diretamente conectadas ao eixo do gerador. O sistema é praticamente sem inércia e proporciona um meio para uma rápida

da supressão do campo do gerador, através da operação como inversor. O retificador do campo do gerador pode também ser dual, ou seja, capaz de inverter a polaridade para reduzir a corrente de campo do gerador.

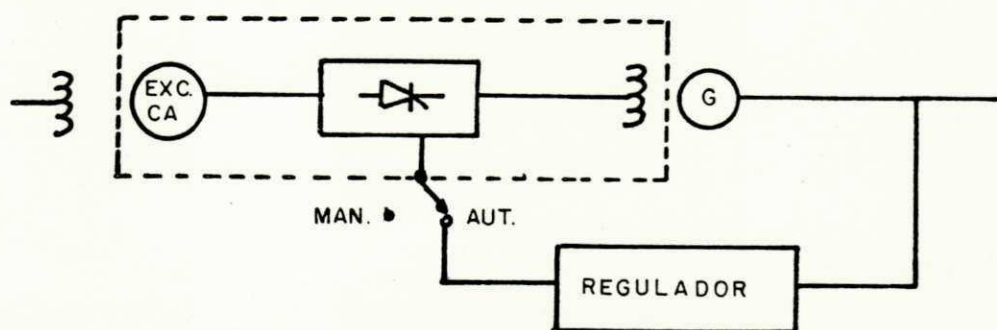


Fig. II.5 - Excitatriz CA com retificadores controlados rotativos (sem escovas) [17].

2a) Excitatriz estática: alimentação direta dos terminais do gerador

Nos sistemas de excitação com excitatrizes estáticas, a energia de excitação do campo do gerador é tirada dos terminais desse gerador, retificada em um regulador a tiristores e enviada ao campo. A Fig. II.6 mostra em diagrama funcional, um desses tipos de excitação. O bloco referente à ponte retificadora pode representar uma ponte a tiristores do tipo misto ou do tipo completo (só tiristores). Sendo que essa última tende, ultimamente, a ser mais usada, tanto pela razão do custo comparativo entre as duas quanto pela possibilidade de o sistema do tipo ponte completa possibilitar a vantagem de ser capaz de inverter a tensão de excitação redu

zindo, portanto, surtos de tensão quando funciona com cargas fortemente indutivas.

Um problema importante que surge em sistema de excitação que utilizam diretamente a tensão terminal do gerador para sua auto-excitação, é o que se refere ao curto-circuito na rede, porque a alimentação da excitação cai ou desaparece quase que completamente, dependendo da impedância entre o gerador e o local da falha. A questão da validade ou não do emprego da auto-excitação está ligada à configuração do sistema e dos equipamentos de proteção. Sistemas auto-excitados diretamente não são adequados para sistemas complexos, como é o caso da maioria dos sistemas industriais [15]. No que se refere à proteção, essa deve atuar prontamente, antes que ocorra o colapso da tensão de excitação.

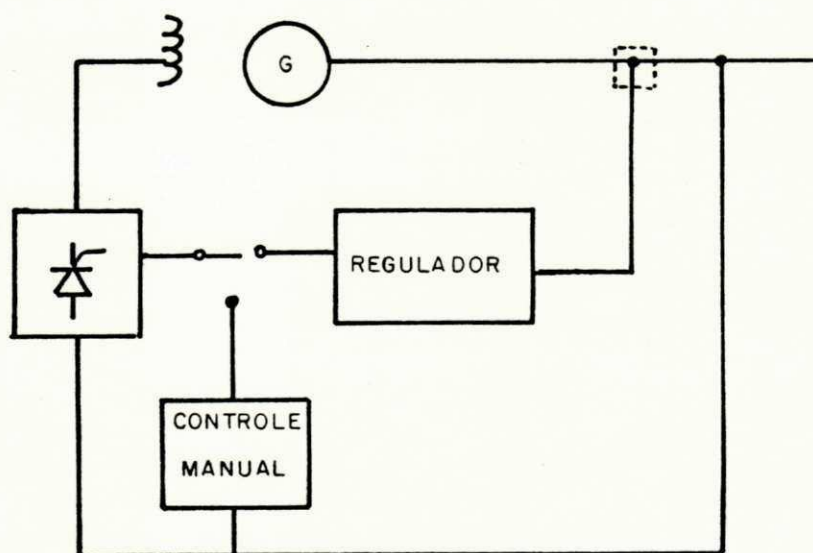


Fig. II.6 - Auto-excitação direta a tiristores

2b) Excitatriz "compound"

Conforme foi dito no item anterior, um problema impor

tante no circuito da excitatriz auto-excitada, é a possibilidade de cair ou mesmo desaparecer a alimentação da excitatriz em caso de curto-circuito na rede. Portanto, um sistema de excitação compound torna-se necessário para enfrentar tais situações.

Várias configurações de auto-excitação direta para geradores síncronos são apresentadas na referência [50], a qual apresenta suficientes detalhes comparativos entre elas.

Dentre os tipos de excitação "compound", uma distinção entre eles pode ser feita: "compound" independente, "compound" paralelo e "compound" série.

A Fig. II.7 mostra um sistema em que a excitação se dá através de dois campos de excitação independentes [09]. Um exemplo de um sistema de excitação que utiliza esse tipo de excitação é o SCTP (General Electric).

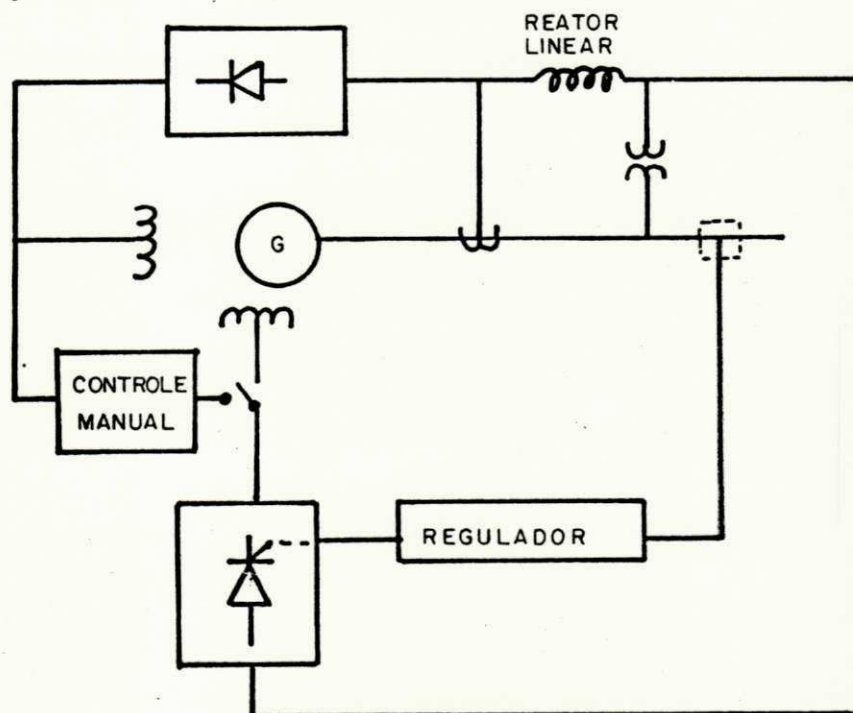


Fig. II.7 - Auto-excitação direta com "compound"

A Fig. II.8 mostra um exemplo de um sistema "Compound" em paralelo (WTA-PCV, Westinghouse) [09], onde o transformador de corrente fornece, através de uma ponte retificadora a diodos, uma corrente de excitação correspondente à característica de curto-circuito do gerador e através do regulador uma excitação adicional é fornecida. Em operação subexcitada, com uma carga capacitiva, a composição atua no sentido oposto ao da adição aritmética. Portanto, com uma carga capacitiva só é possível operar acima de aproximadamente 20% da corrente nominal, quando a excitação solicitada pelo gerador tende para a componente de excitação fornecida pela composição. Para uma dada carga capacitiva, é possível curto-circuitar o secundário do TC através, por exemplo, de um relé direcional de energia reativa, para neutralizar a composição [15].

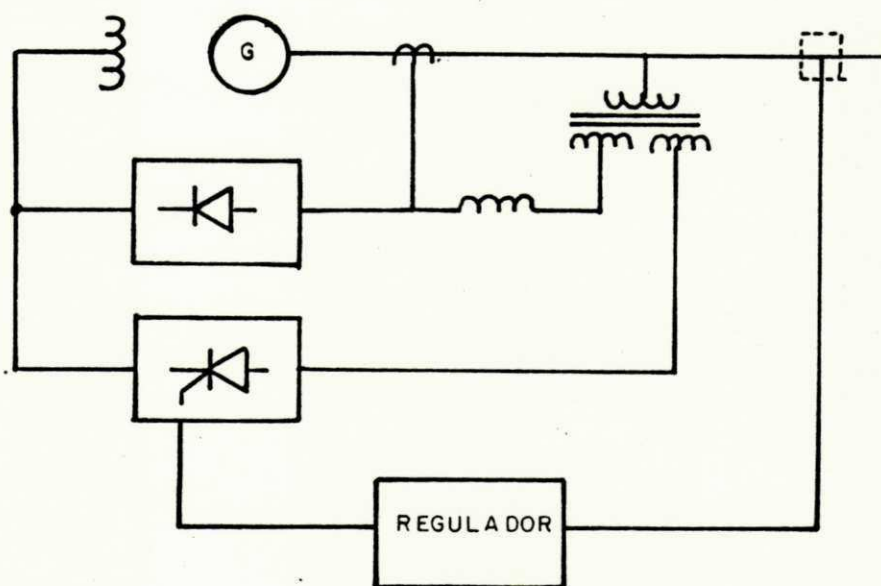


Fig. II.8 - "Compound em paralelo"

A Fig. II.9 apresenta um diagrama simplificado de um sistema de excitação que pode ser caracterizado como "compound série". Neste sistema a tensão do regulador é acrescida por uma ponte a diodos, alimentada a partir de um transformador de corrente a núcleo de ar. A corrente do gerador flui através do lado primário do transformador e uma tensão proporcional a esta corrente é produzida no lado secundário do mesmo. Essa tensão é retificada e somada aritmeticamente à tensão de saída da ponte a tiristores. Como existe uma conexão em série das duas pontes retificadoras, justifica-se a denominação "compound série".

O valor da corrente de curto-circuito contínua é determinada pela saturação do transformador a núcleo de ar e é no mínimo duas vezes a corrente nominal.

Como a componente de corrente é adicionada aritmeticamente e não vetorialmente, há um sobrecomposição quando o fator de potência é unitário e mais ainda quando a operação é capacitiva. Por essa razão, a ponte controlada é sempre o último estágio, pois ela permite a geração de tensões negativas permitindo a compensação do excesso de tensão no equipamento "compound" [15, 50].

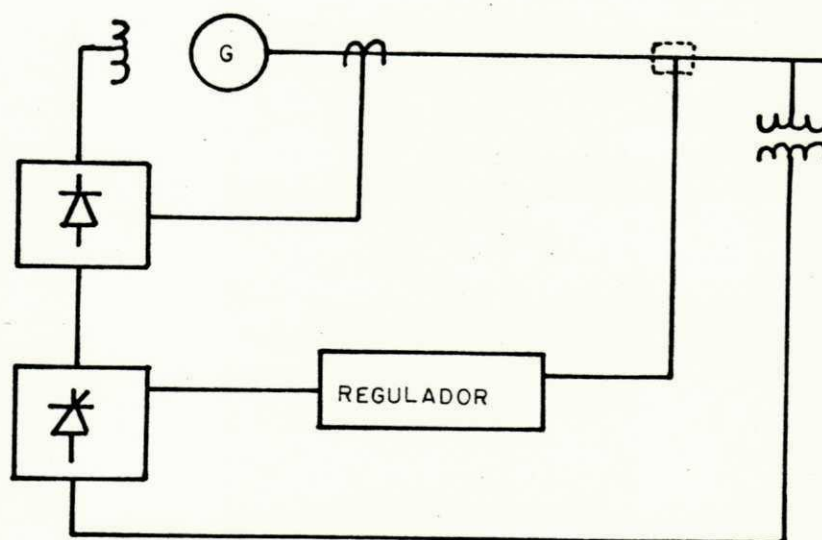


Fig. II.9 - "Compound Série"

II.3 COMPONENTES DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

Embora exista um grande número de sistemas de excitação, o princípio de operação é comum. Todos os sistemas de excitação são compostos, basicamente, de uma excitatriz, um regulador de tensão, um amplificador, um sistema auxiliar de partida, um sistema de proteção e um sistema de controle manual. A Fig. II.10 mostra em diagrama de blocos, o arranjo destes componentes e a seguir são feitas considerações sobre essas partes.

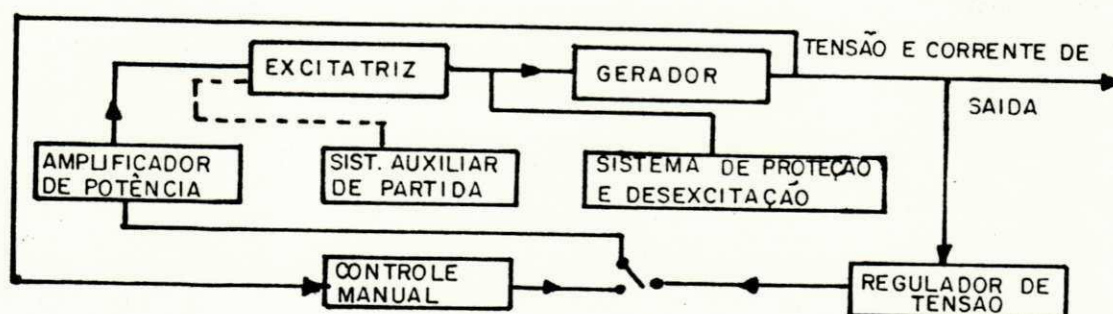


Fig. II.10 - Componentes de um Sistema de Excitação

II.3.1 A excitatriz

A função da excitatriz é fornecer a corrente contínua necessária à alimentação do campo gerador síncrono.

Conforme foi visto no ítem II.2, a excitatriz do sistema de excitação pode ser rotativa ou estática. No caso de ser rotativa, dois tipos de máquinas podem ser usadas: uma máquina de corrente contínua com comutador ou uma máquina de corrente alternada. Nessa última alternativa, a excitação do campo do gerador principal é feita a partir da tensão CA gerada pela excitatriz, após sua retificação através de retificadores controlados (a tiristores) ou não (a diodos). No caso de a excitatriz ser estática, a alimentação da ponte controlada provém dos terminais do próprio gerador.

a) Excitatriz CC

A Fig. II.11 mostra um diagrama esquemático de uma excitatriz CC, excitada em separado, que servirá de base para o estabelecimento do modelo matemático dessa excitatriz.

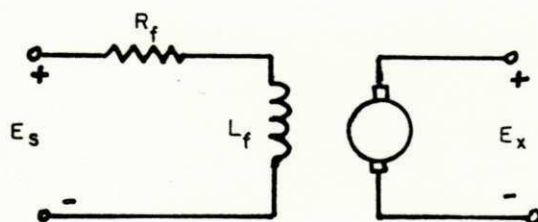


Fig. II.11 - Excitatriz CC excitada separadamente

Equação do campo:

$$E_s = I_f R_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Conforme já foi dito anteriormente, a excitatriz pode ser acionada mecanicamente através do eixo do próprio gerador, ou pode ser acionada separadamente; contudo, os efeitos da variação da velocidade são desprezíveis e conseqüentemente a velocidade pode ser considerada constante em cada caso.

E_x é uma função não linear de I_f , conforme pode se observar da curva de saturação da excitatriz em carga, mostrada na figura II.12 e essa relação pode ser expressa como:

$$I_f = \frac{E_x}{R_g} + \Delta I_f \quad (\text{II.2})$$

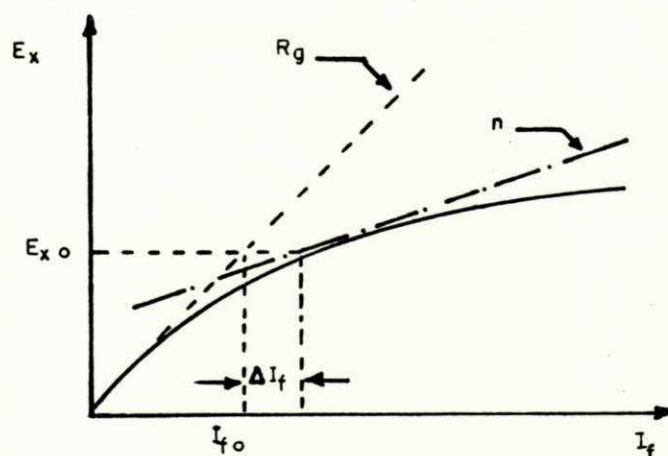


Fig. II.12 - Curva de saturação de excitatriz em carga

ΔI_f representa a corrente adicional necessária devido à saturação e está relacionada com a função saturação S_E (em A/V) da seguinte forma:

$$\Delta I_f = S_e E_x \quad (II.3)$$

Substituindo a equação (II.3) na (II.2),

$$I_f = \frac{E_x}{R_g} + S_e E_x \quad (II.4)$$

Com o objetivo de expressar as equações em por unidade, as seguintes quantidades base são definidas:

Tensão de base da excitatriz E_{xb} = tensão da excitatriz correspondente à tensão de circuito aberto do gerador na linha de entreferro.

Resistência de base da excitatriz $R_{gb} = R_g$

Corrente de base da excitatriz $I_{fb} = E_{xb}/R_{gb}$

Portanto, a equação (II.e) em p.u fica sendo:

$$\bar{I}_f = \bar{E}_x + R_{gb} S_E \bar{E}_x \quad (II.5)$$

e a equação (II.1) torna-se:

$$\bar{E}_s = \bar{I}_f \frac{R_f}{R_{gb}} + \frac{L_f}{R_{gb}} \frac{d\bar{I}_f}{dt} \quad (II.6)$$

onde E_{xb} é a base de E_s .

A função saturação S_E pode ser definida em p.u por:

$$S_E = \frac{\Delta \bar{I}_f}{\bar{E}_x} = R_{gb} S_e \quad (II.7)$$

$$\frac{d\bar{I}_f}{dt} = \frac{d\bar{I}_f}{d\bar{E}_x} \cdot \frac{d\bar{E}_x}{dt} \quad (II.8)$$

Substituindo as equações (II.5), (II.7) e (II.8) na equação (II.6),

$$\bar{E}_s = \left[\frac{R_f}{R_{gb}} \right] \left[\bar{E}_x + S_E \bar{E}_x \right] + \left[\frac{L_f}{R_{gb}} \right] \left[\frac{d\bar{I}_f}{d\bar{E}_x} \right] \left[\frac{d\bar{E}_x}{dt} \right] \quad (II.9)$$

seja

$$L_{fu} = L_f \left[\frac{d\bar{I}_f}{d\bar{E}_x} \right] \Big|_{E_x = E_{x0}} \quad (II.10)$$

Onde E_{x0} é o valor de E_x no ponto de operação, então

$$\bar{E}_s = \begin{bmatrix} R_f \\ R_{gb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_x + S_E \bar{E}_x \end{bmatrix} + \frac{L_{fu}}{P_{gb}} \frac{d\bar{E}_x}{dt} \quad (II.11)$$

Em forma de diagrama de blocos a equação anterior pode ser representada pela Fig. II.13, podendo ser também representada, ainda em diagrama de blocos, mas de forma reduzida, pela figura II.14.

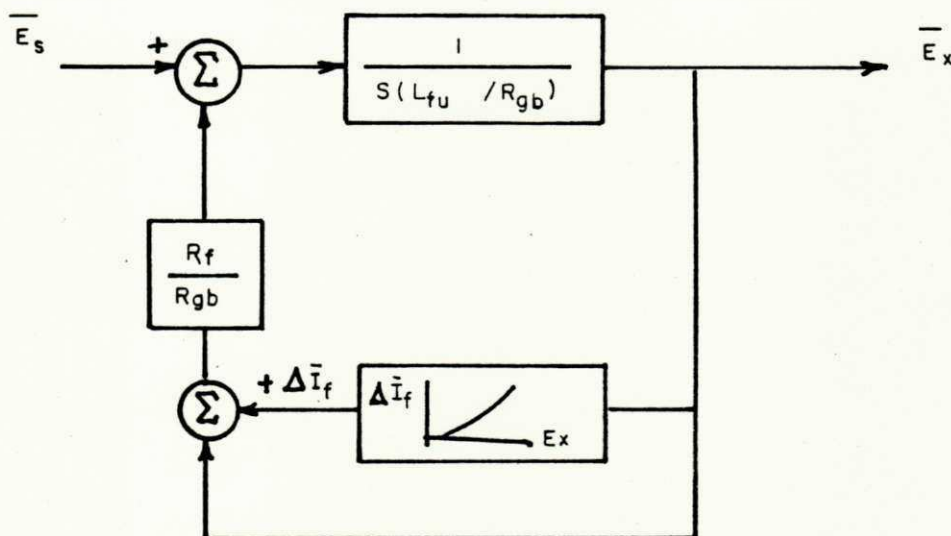


Fig. II.13 - Excitatriz CC excitada separadamente (modelo)

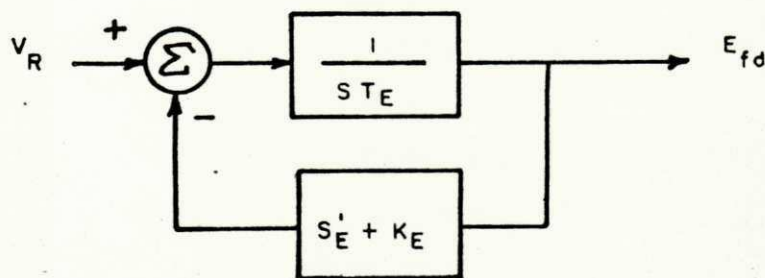


Fig. II.14 - Diagrama de blocos de excitatriz CC

onde $K_E = R_f/R_{gh}$

$$T_E = L_{fu}/R_{gb}$$

$$S'_E = R_f S_E/R_{gb}$$

$$V_R = \bar{E}_S$$

$$E_{fd} = \bar{E}_x$$

Negligenciando a saturação e considerando pequenas variações,

$$\frac{E_{fd}(s)}{V_R(s)} = \frac{1}{K_E + ST_E} \quad (II.12)$$

b) Excitatriz CA

Nas excitatrizes CA, desde que se despreze a saturação, pode-se afirmar que sua tensão terminal é proporcional à corrente de campo. A forma como irá variar a corrente de campo dependerá em muito da impedância externa do circuito de estator ou da impedância da carga. Mas, usando a definição de razão de resposta (ver Apêndice A) pode-se considerar a excitatriz CA em circuito aberto. Nesse caso a corrente de campo na excitatriz varia de acordo com a "constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto", T'_{do} onde

$$T'_{do} = L_F/r_f \quad (II.13)$$

De forma análoga à da excitatriz CC, a função de transferência da excitatriz CA pode ser escrita, no domínio

de Laplace por,

$$E_{fd(s)} = K/(1+sT_{do}') V_{R(s)} \quad (II.14)$$

onde $E_{fd(s)}$ é a transformada de Laplace da tensão de campo em circuito aberto e $V_{R(s)}$ é a transformada da tensão do regulador [01] .

c) As vantagens das excitatrizes estáticas sobre as excitatrizes rotativas

Atualmente, para geradores de grande porte, o que se tem utilizado são sistemas de excitação estático de resposta rápida, no sentido de melhorar a estabilidade dinâmica do sistema de potência. Através desses sistemas de excitação, a corrente de campo do gerador síncrono pode ser variada, num tempo extremamente pequeno, com relação às mudanças nas condições de operação do sistema. Dentre as vantagens das excitatrizes estáticas sobre as excitatrizes convencionais CC e CA, podem ser destacadas as seguintes [43] :

- a) Reduzido custo operacional, devido às baixas perdas e reduzida manutenção;
- b) Maior confiabilidade;
- c) Maior velocidade de resposta, devido à ausência da constante de tempo da máquina - excitatriz;
- d) Possibilidade de plena faixa de excitação de positiva à negativa, quase que instantaneamente;
- e) Menor comprimento do eixo da máquina, com consequente menor custo de obras civis;

- f) O equipamento de excitação pode ser instalado em separado do gerador;
- g) Menor nível de ruído.

Como indicado anteriormente os retificadores a estado sólido são parte integrante das excitatrizes mais modernas. Por essa razão esses equipamentos são examinados a seguir.

II.3.2 Pontes Retificadoras

a) Pontes a diodos

As pontes a diodos de maior potência são utilizadas nos sistemas de excitação com excitatriz CA - retificador a diodos, girante ou estacionário. Os pontos especificados para tal retificador são [15] :

- O retificador deve ser calculado para uma tensão e uma corrente não inferior a 110% das especificações dos geradores quando operando em valores nominais;

- No esquema do retificador estático, a chave de campo e o circuito de supressão devem ser mantidos para seus objetivos normais;

- Pelo menos 20% dos diodos devem poder ser removidos ou danificados sem afetar a operação do sistema como um todo;

- O retificador deve ser capaz de suportar quaisquer surtos de tensão ou corrente que apareçam no circuito durante falhas do sistema.

No caso de ponte girante, os diodos são colocados no lado onde o rotor não é acionado mecanicamente.

b) Pontes a tiristores

As pontes a tiristores podem ser girantes ou estacionárias. As pontes são normalmente escolhidas porque são os circuitos retificadores que impõem uma menor tensão reversa ou direta sobre os tiristores. Os retificadores trifásicos de meia onda são, por exemplo, limitados a aplicações em que a tensão do teto não ultrapasse 350V, além de necessitarem transformadores. Entre as pontes pode-se utilizar as mistas (semi-controladas - 3 tiristores e 3 diodos) ou as totalmente controladas. A principal diferença é que as pontes mistas não podem inverter a polaridade da tensão. A descarga da energia armazenada em uma carga indutiva é governada pela constante de tempo natural da carga. Uma ponte totalmente controlada permite inverter a polaridade de sua tensão, eliminando os circuitos de supressão de campo. As figuras II.15 e II.16, mostram as relações da tensão retificada com o ângulo de disparo e com a tensão de controle, respectivamente.

Um exemplo, é uma ponte retificadora girante da GE de um sistema de excitação de 500 KW, 375V, 90rpm [20], constituída de 4 tiristores em paralelo, cada um com uma tensão reversa nominal de 2.5 vezes a tensão rms da excitatriz.

Quando a ponte é girante, o conjunto de tiristores é montado em um disco sólido, de material isolante, em uma configuração tipo ventilador, para permitir a refrigeração dos

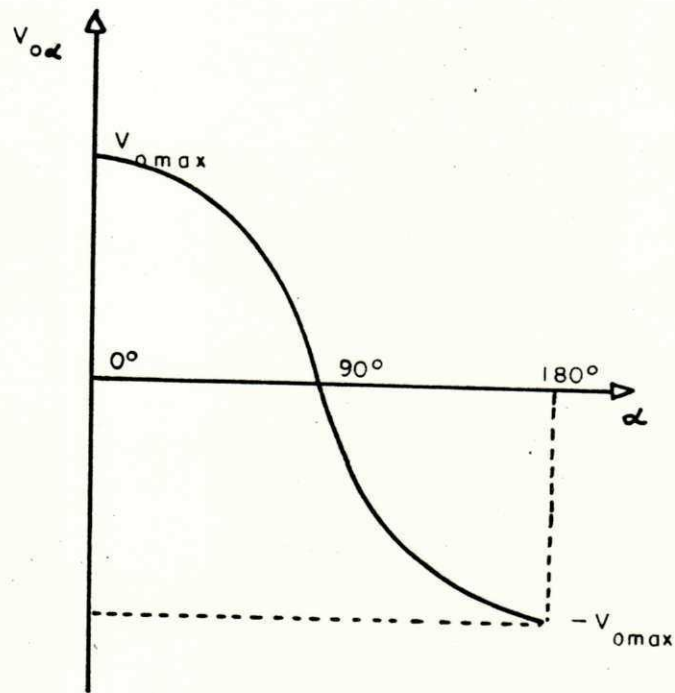


Fig. II.15 - Relação tensão retificada e ângulo de disparo

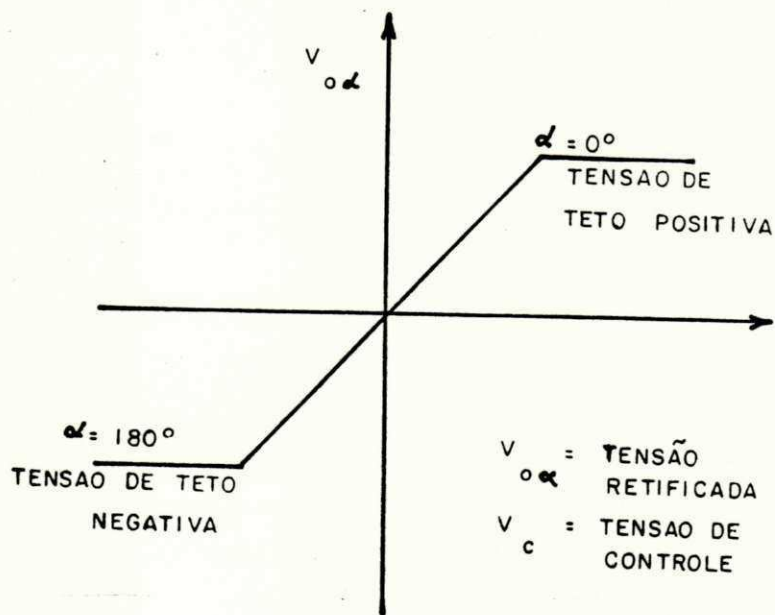


Fig. II.16 - Relação tensão retificada e tensão de controle

semicondutores com ar forçado.

Os sistemas de disparo dos tiristores devem enviar pulsos simultâneos quando houver conexão de tiristores em paralelo ou em série.

II.3.3. Sistema Auxiliar de Partida e Controle Manual

Os geradores cuja energia necessária para a excitação é obtida diretamente dos seus terminais, necessitam de um sistema auxiliar para iniciar a excitação, pois, mesmo possuindo uma tensão residual, em vazio, esta pode não ser suficiente para por em funcionamento o regulador portanto, a excitação de partida deve ser obtida a partir da retificação da alimentação auxiliar.

Exemplos de sistemas de excitação que utilizam sistema auxiliar de partida foram mostrados nas figuras II.3, II.4 e II.5 com excitatriz CA e de forma não explícita nos sistemas de excitação com excitatriz estática, no item II.2.2.

O controle manual pode ser definido como sendo os elementos do sistema de controle da excitação, que proporcionam o ajuste manual da tensão terminal da máquina síncrona, através do controle de malha aberta [09]. A função do controle manual é permitir que o gerador opere, sob condições limitadas, caso ocorra uma falta no regulador e o mesmo seja retirado do sistema. Portanto, o controle manual deve ser considerado como uma medida de emergência. O controle manual preventi

vo envolve não somente a unidade de regulação manual efetiva, como também os equipamentos necessários de transferência (automático/manual) e balanceamento, incorrendo naturalmente em custos extras. Por essas razões geralmente é mais econômico, especialmente onde só se precisa de um pequeno regulador, ficar sem o controle manual e manter uma unidade de reserva disponível para que no caso de defeito, a unidade defeituosa possa ser substituída por uma nova unidade modulada [50].

Deve-se observar também, que existem sistemas de excitação onde é impossível usar um simples controle manual. Um caso particular é o sistema de excitação "compound série" mostrado na Fig. II.9.

II.3.4 Sistemas de Proteção

Os geradores são os mais caros equipamentos no sistema de potência CA. A proteção desses geradores e de seu sistema de controle, envolve considerações das mais variadas condições de operações anormais possíveis, que qualquer outro elemento do sistema.

Dentre os vários aspectos de proteção do gerador (falhas internas, sobreaquecimento, sobretensões, perda de sincronismo, vibrações, motorização, sobrevelocidade, etc...) serão destacados, neste Capítulo, aspectos de proteção do gerador referentes ao circuito supressor de campo (ou desexcitação) e ao circuito supressor de tensão.

a) Circuito supressor de campo (ou de desexcitação)

Se ocorrer uma falha nos terminais do gerador ou no sistema de desexcitação, o campo deve ser suprimido o mais rápido possível e de forma completa, com a finalidade de limitar os danos decorrentes da falha.

Por essa razão, normalmente, o retificador é conectado ao campo da máquina síncrona através de um disjuntor especial de corrente contínua. Este disjuntor possui dois contatos de operação e um de repouso, que se fecha antes dos outros abrirem, conectando as resistências de desexcitação em paralelo com os terminais do rotor (Fig. II.17). Estas resistências têm seu valor adaptado à resistência do rotor e podem ter característica linear ou não linear. O circuito é protegido por fusíveis [15].

Uma outra possibilidade é a utilização de um diodo em série com o resistor (Fig. II.18). Nesse caso, a desexcitação é obtida, antes de tudo, suprimindo os sinais de disparo dos tiristores. O bloqueio da ponte só ocorre quando o valor instantâneo da tensão de alimentação excede a tensão resultante do valor da resistência de descarga multiplicada pela corrente de excitação. A resistência deve ser tal que mesmo conduzindo a máxima corrente de excitação, a queda de tensão não ultrapasse o valor de pico da fonte de alimentação. Uma vantagem dessa solução é que, durante a operação normal de excitação, intervalos na condução da resistência de descarga ocorrem nos instantes a tensão de saída da ponte se torna nega

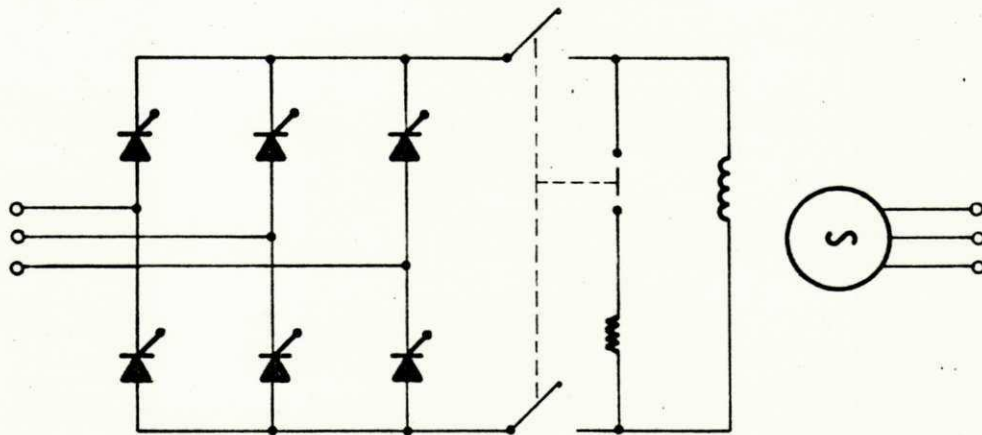


Fig. II.17 - Circuito de desexcitação através de um resistor

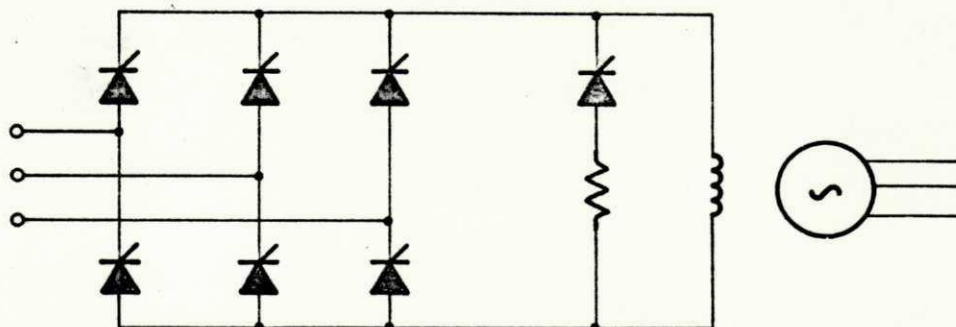


Fig. II.18 - Circuito de desexcitação através de um diodo em série com um resistor

tiva (toda vez que o ângulo de disparo excede 60° , como por exemplo, durante a operação em vazio da máquina síncrona). Isto acarreta dissipação de energia e efeitos indesejáveis de aquecimento; ainda mais, o desempenho da excitatriz em condições de teto negativo torna-se dependente do valor da corrente de campo o que é indesejável no caso de uma máquina operando com baixa corrente de campo no caso de carga capacitiva.

Uma solução melhor é proporcionada pelo uso de um tiristor em vez de um diodo (desexcitação por tiristor- resis- tência). A desexcitação se realiza pela supressão dos pulsos de disparo da ponte, disparo do tiristor de descarga e abertura da chave C (Fig. II.19).

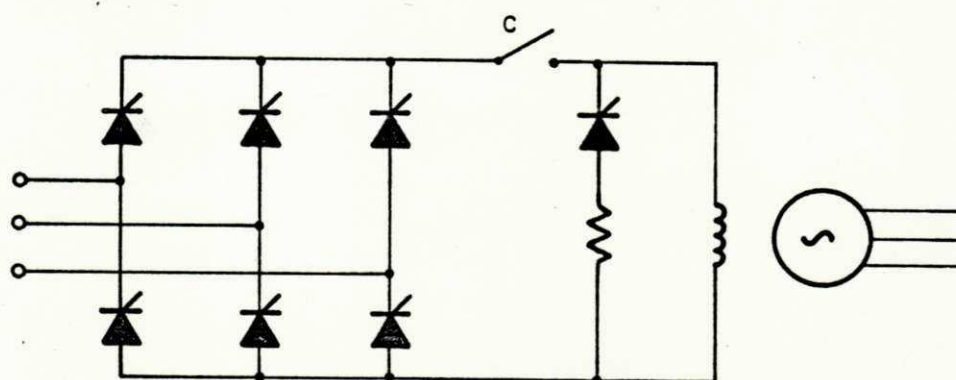


Fig. II.19 - Circuito de desexcitação através de um tiristor em série com um resistor

b) Circuito de supressão de sobretensão

O campo e os tiristores são protegidos contra sobre- tensões através de diversores, que consistem de discos de selênio, fabricados especialmente para esse fim, com caracte- rísticas tensão X corrente semelhante às dosdiodos Zener [15].

As sobretensões no campo de um gerador podem ocorrer pelas seguintes causas:

- Abertura ou comutação acidental na fonte de alimentação CA da excitatriz, acarretando uma sobretensão oposta à excitação normal;

- Saída de sincronismo acidental, no caso de falha na rede, por exemplo, quando a corrente de excitação tender a uma reversão que acarreta uma sobretensão do mesmo sinal que a excitação normal.

A Fig. II.20, apresenta um esquema onde as sobretensões do primeiro caso podem ser eliminadas pelo disparo do tiristor T1 e as do segundo caso pelo disparo do tiristor T2.

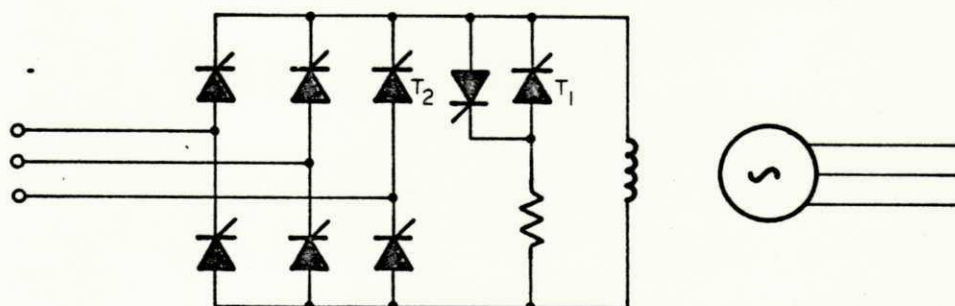


Fig. II.20 - Circuito supressor de sobretensões através dos tiristores T1 e T2

II.3.5 Regulador da Máquina Síncrona

O regulador de tensão de uma máquina síncrona aconpla as variáveis de saída da máquina à entrada da excitatriz, a

través de elementos de controle diretos e de realimentação , com o objetivo de regular as variáveis de saída da máquina síncrona [01, 06].

Os primeiros reguladores de tensão eram totalmente manuais, do tipo eletromecânico de ação direta e caracterizados por possuírem resposta lenta, além de apresentarem grande dissipação de potência nas resistências comutáveis, através das quais a corrente de excitação da excitatriz era regulada. Esses reguladores portanto, tinham seu uso limitado a geradores de pequeno e médio porte.

Com o aumento das dimensões dos geradores e as interligações dos sistemas de potência começaram a aparecer reguladores reostáticos de ação indireta, que embora tendo maior capacidade de controlar a corrente de excitatrizes de maior porte são limitados na sua velocidade de resposta devido a vários atrasos mecânicos [01].

No sentido de substituir o reostato do campo, foram desenvolvidos reguladores de tensão eletrônicos. Esses reguladores controlavam o ângulo de disparo das válvulas (tubos ignitono) para controlar a tensão de saída do retificador que alimenta o enrolamento do campo da excitatriz principal. No entanto, apesar de operarem de forma satisfatória, não foram usados em larga escala devido a dois fatores: custo inicial e de manutenção que comparativamente aos outros tipos de reguladores eram muito altos [02].

Pode-se dizer que o regulador da máquina síncrona é

constituído dos elementos de uma malha principal de regulação e de elementos adicionais.

A Fig. II.21 mostra o diagrama de blocos generalizado, do ponto de vista de controle, de um sistema de excitação, situando as funções de cada componente dentro do mesmo. Os traços cheios indicam a malha principal do sistema de controle cuja realimentação é constituída pelos elementos de detecção primária, ou seja, pelos elementos que primeiro utilizam ou transformam energia para produzir um sinal que é uma fun

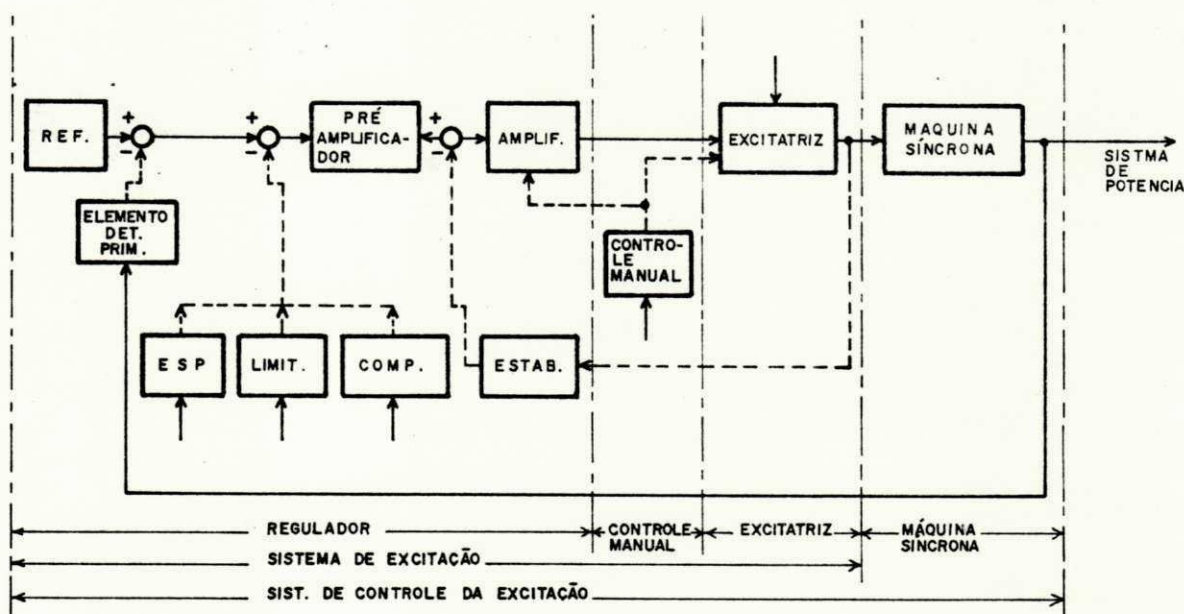


Fig. II.21 - Diagrama de blocos do sistema de controle de excitação

ção do valor da variável controlada (a tensão de saída do gerador). Comparando esse sinal a um sinal de referência obtem-se um sinal de erro, que, amplificado, fará a excitatriz atuar no sentido de corrigir quaisquer variações da variável controlada. No caso de um sistema de excitação só possuir essa malha primária, como na regulação da excitatriz da Fig.

II.2, o regulador será definido como "regulador primário". Em pontilhado são indicados outros elementos, adicionais, que produzem sinais com a finalidade de melhorar o desempenho do sistema: compensadores, limitadores, estabilizador de sistema de potência (ESP), estabilizador da excitação, podendo ainda serem introduzidos outros sinais auxiliares.

Nas Figs. II.2 a II.5 foram mostrados diferentes tipos de regulação de sistemas de excitação. Na Fig. II.2 a regulação é obtida através de um amplificador de potência, que alimenta o campo da excitatriz e seu regulador. No sistema mostrado na Fig. II.4 são feitas duas regulações: uma do amplificador da excitatriz e outra da ponte retificadora da excitatriz. Finalmente, no sistema mostrado na Fig. II.5 a regulação é feita através da ponte a tiristores que se constitui na própria excitatriz estática. Nos três casos, os reguladores do amplificador de potência das Figs. II.2 e II.3, da ponte retificadora da excitatriz da Fig. II.4 e da excitatriz estática da Fig. II.5, possuem, basicamente, os mesmos componentes: detetor de erro, pré-amplificadores, estabilizadores, limitadores e outras entradas auxiliares. O regulador do amplificador da excitatriz da Fig. II.4 é mais simples e se compõe apenas do detetor de erro e pré-amplificador, partes integrantes dos outros reguladores, constituindo-se, em um regulador primário.

De um modo geral o regulador do sistema de excitação pode ser definido como composto de um amplificador de potência, de um regulador desse amplificador (regulador primário) e de sinais adicionais.

II.3.5.1 Amplificador de Potência

O primeiro passo no sentido da sofisticação dos sistemas de excitação primitivos foi a introdução de um amplificador na malha de realimentação do sistema de regulação. Em alguns sistemas o amplificador utilizado foi o amplificador rotativo ou amplidínamo, enquanto noutros foram utilizados amplificadores magnéticos, sendo utilizados mais modernamente pré-amplificadores e amplificadores a estado sólido [09].

a) Amplificadores rotativos

Os amplificadores rotativos são máquinas de corrente contínua especiais, utilizadas para forçar o campo da excitação na direção desejada, no sentido de se obter uma resposta mais rápida do sistema de excitação.

b) Amplificadores magnéticos

Os amplificadores magnéticos consistem basicamente de um reator de núcleo saturável e um retificador. Uma vantagem desse tipo de amplificador sobre o rotativo é a ausência de partes rotativas. A Fig. II.22 mostra um esquema básico de um amplificador magnético.

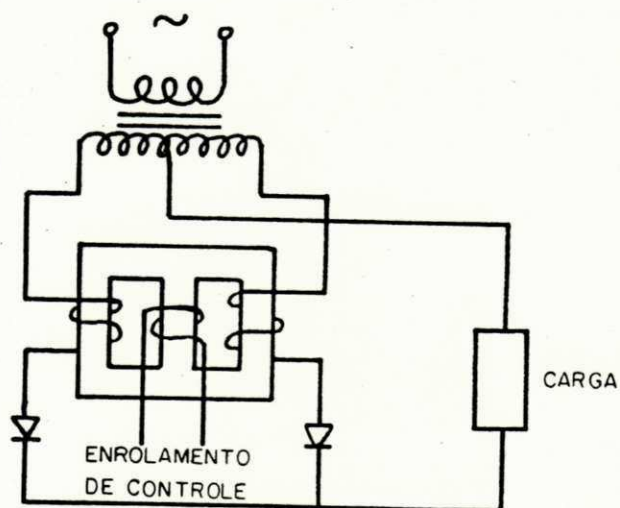


Fig. II.22 - Amplificador magnético

c) Amplificadores a estado sólido

Os amplificadores a tiristores, na forma de pontes retificadoras, são os mais utilizados, atualmente. Em alguns casos são utilizados em conjunto com pontes a diodos formando sistemas "compound", como indicado no ítem II.2. Os tipos de pontes utilizados são os mesmos já discutidos no ítem II.3.2.

Nos circuitos retificadores a tiristores o valor médio da tensão de saída V_e é controlado a partir de uma tensão de controle V_c oriunda do sinal de erro do regulador. Uma técnica utilizada para a determinação do instante de disparo dos tiristores é a comparação entre um dente de serra, sincronizado com a rede, e a tensão de controle, Fig. II.14. No entanto, nesse caso, a relação entre V_e e V_c é não linear. Para se obter uma relação linear, a tensão de

controle pode ser comparada com uma cosenóide. A Fig. II.23 apresenta o princípio básico dessa linearização.

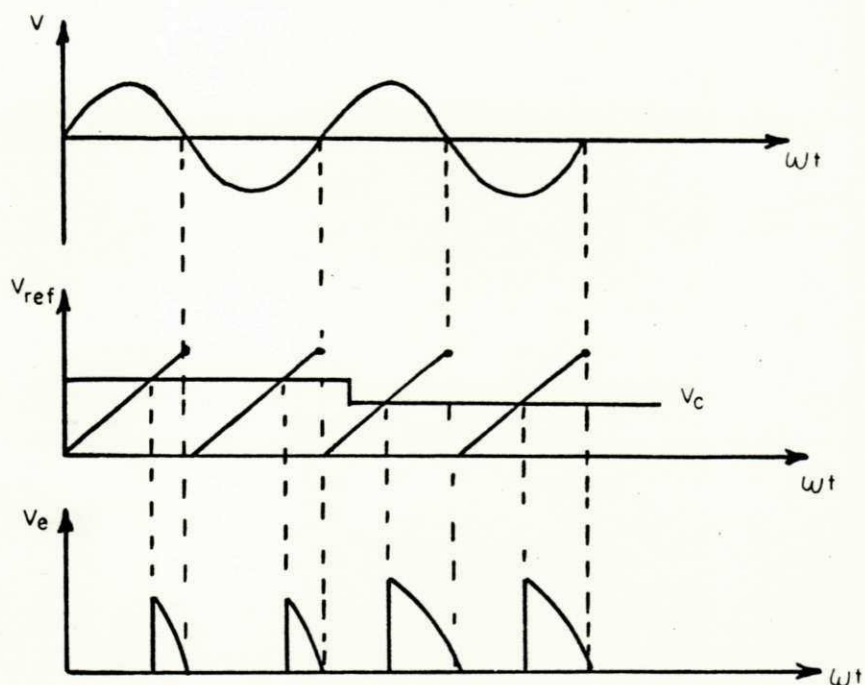


Fig. II.23 - Controle do gatilho com relação linear entre V_c e α

Nas pontes simétricas retificadoras a tiristores, alimentando carga resistiva ou carga indutiva (campo da excítriz) com diodo de circulação, o valor médio da tensão de saída retificada é dada pela expressão [46]:

$$V_e = K(1 + \cos \alpha) \quad (\text{II.15})$$

No caso da relação linear entre V_c e ângulo de disparo, são válidas as seguintes expressões:

$$V_c = a\alpha \quad (\text{II.16})$$

$$V_e = K(1 + \cos(V_c/a)) \quad (\text{II.17})$$

Para obter-se uma relação entre V_e e V_c , de acordo com a equação II.6, necessita-se fazer:

$$V_c = K_2(1 + \cos\alpha) \quad (\text{II.18})$$

ou seja $V_e = K_3 V_c \quad (\text{II.19})$

Se o instante de disparo for determinado pela interseção de uma forma de onda $K_2(1 + \cos\alpha)$ com uma tensão de controle V_c , como indicado na Fig. II.24, a expressão será satisfeita [45].

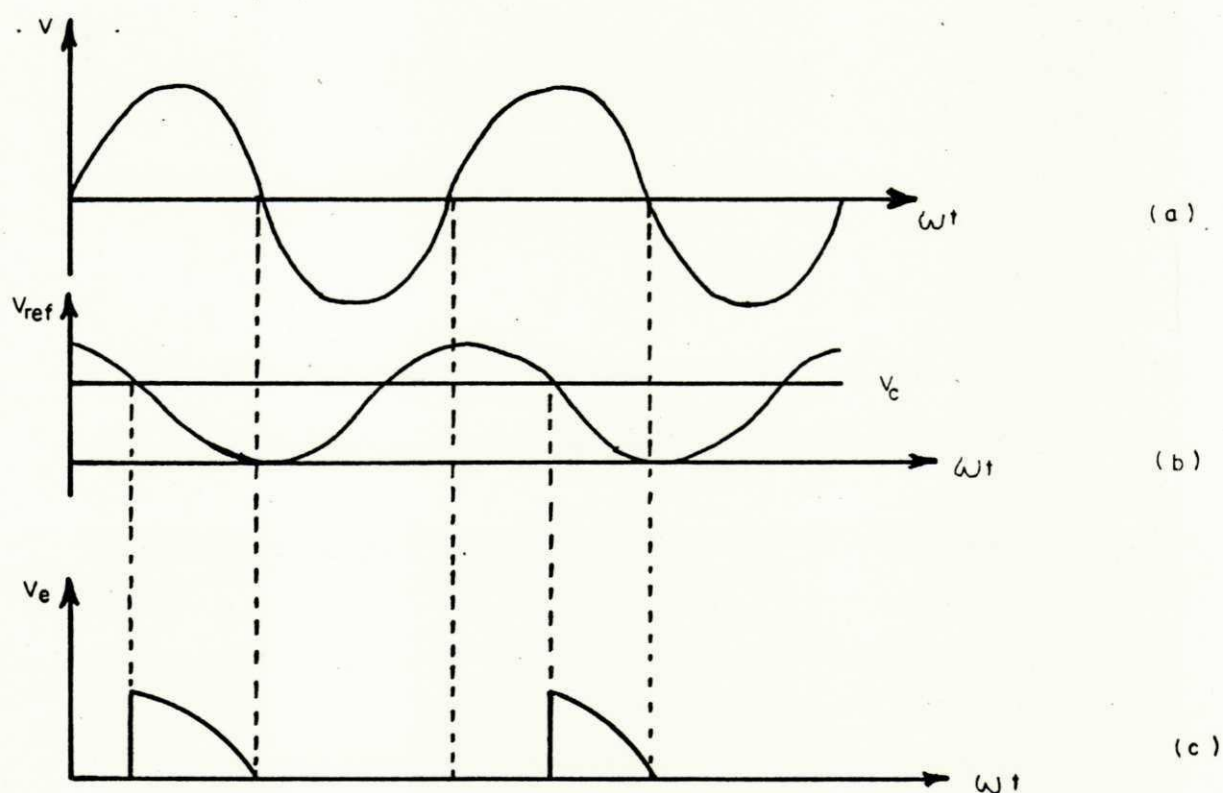


Fig. II.24 - Controle do gatilho com relação linear entre V_e e V_c .

II.3.5.2 O Regulador Primário

A Fig. II.25 mostra um diagrama de princípio desse regulador primário. A tensão de saída da excitatriz é detectada através de um transformador de potência (TP), retificada e filtrada. Essa tensão proporcional representa a tensão de saída real da excitatriz. O somador compara V_{DC} com uma tensão de referência fixa, V_R , fornecendo uma tensão de erro atuante, proporcional à diferença de tensão, dando origem à chamada tensão de controle V_C que modifica o ângulo de disparo dos tiristores e, conseqüentemente, à tensão do campo da excitatriz, V_e .

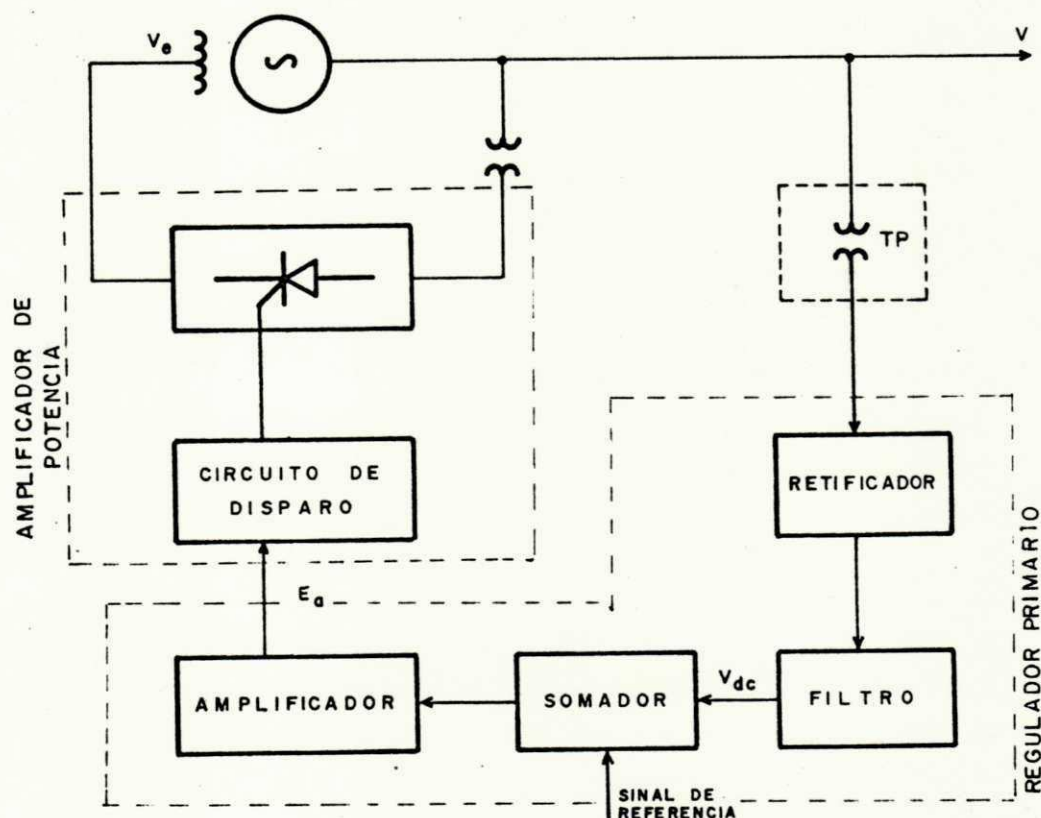


Fig. II.25 - Diagrama de princípio do regulador de uma excitatriz C.A

Uma possível conexão para os blocos referentes ao detetor, retificador e filtro é apresentada na Fig. II.11, onde os secundários do transformador de potencial são conectados às pontes retificadoras ligadas em série. O filtro capacitivo elimina as oscilações da tensão antes de compará-la com a referência. Nesse caso,

$$V_{dc} = K_R V / (1 + T_R S) \quad (II.20)$$

Onde K_R é uma constante de proporcionalidade e a constante de tempo de filtragem T_R situa-se normalmente na faixa: $0 \leq T_R \leq 0,06$ s [01].

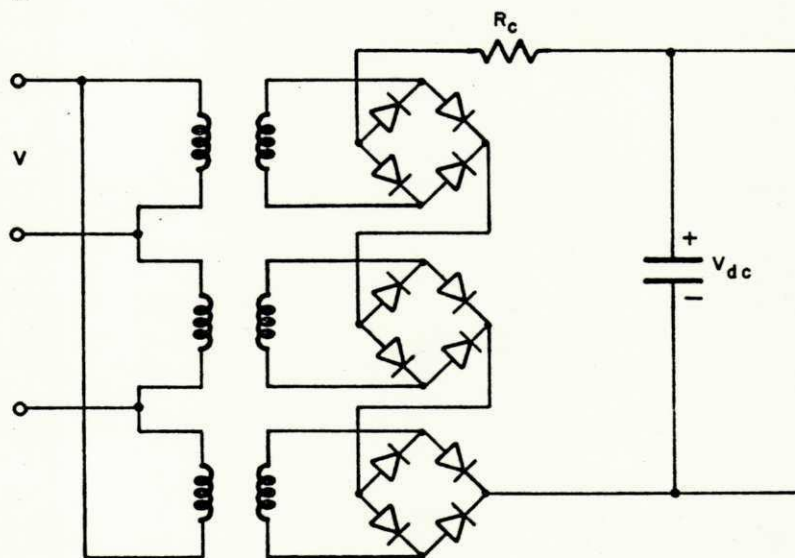


Fig. II.26 - Diagrama do elemento detetor (TP), ponte retificadora e filtro

A saída do amplificador fornece uma tensão proporcional à diferença entre a tensão de referência, V_{ref} e a tensão V_{dc} .

$$E_a = K(V_{ref} - V_{dc}) \quad (II.21)$$

Existem várias maneiras de se obter essa função, uma delas seria um circuito usando amplificador operacional conforme a figura II.12.

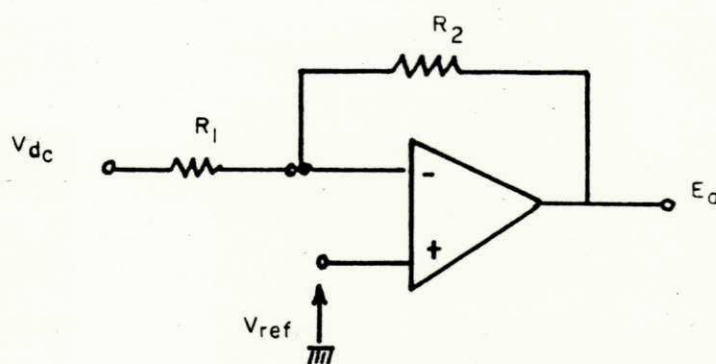


Fig. II.27 - Circuito amplificador

$$E_a = \frac{R_2}{R_1} (V_{ref} - V_{dc}) \quad (II.22)$$

O amplificador pode ser a transistor ou a amplificador operacional. No caso do amplificador operacional, este pode ser incorporado ao somador. Neste caso, a tensão de controle $V_c = E_a$. Entretanto, pode ser necessário usar um amplificador em separado, e nesse caso, assumindo a amplificação de tensão linear:

$$V_c = K_A \cdot E_a / (1 + sT_A) \quad (II.23)$$

onde T_A é a constante de tempo do amplificador.

Em qualquer amplificador um valor de saturação deve ser especificado:

$$V_{cmin} < V_c < V_{cmax}$$

II.3.5.3 Elementos Adicionais

No diagrama da Fig. II nota-se perfeitamente a introdução de sinais adicionais ao regulador básico; uma malha de realimentação para estabilizar a excitação (EST.), compensadores (COMP.), limitadores (LIM.) e estabilizadores de sistema de potência (ESP).

a) Compensadores

a.1) Compensador de Corrente Ativa e Reativa

Em algumas aplicações, deseja-se manter constante a tensão em algum ponto remoto da rede, e não nos terminais do gerador ou transformador. Portanto, deve-se usar algum dispositivo que introduza uma queda de tensão equivalente na unidade de medição. Esse dispositivo é o compensador de corrente ativa e reativa. A Fig. II.28.a, indica um método de compensação para um circuito trifásico da saída do gerador [20]. Um transformador de potencial é colocado entre as linhas A e B e um transformador de corrente na linha B. O transformador de corrente alimenta uma resistência R , de modo que a queda de tensão em R , é somada à tensão V_{AB} . O diagrama vetorial para o conjunto é indicado na Fig. II.28.b, onde se verifica que a tensão aplicada à unidade de medição é reduzida pela queda de tensão RI e, portanto, desde que o regulador tende a manter V_{MU} constante, haverá um aumento na tensão do gerador para permitir a queda de tensão na linha. A variação da

tensão é proporcional à corrente da linha, mas varia com o fator de potência (para uma corrente fixa), como indica a Fig. II.28.d. Como a linha possui reatância e resistência, as quedas de tensão devido a esses parâmetros são indicadas na Fig. II.28.c, dando uma queda na impedância total, I_Z . Esse método é correto para uma linha que tenha a relação X/R de 0,577 [04]. É claro que nem todas as linhas possuem essa relação, mas o método é suficientemente preciso para linhas normais, particularmente se o fator de potência não variar muito.

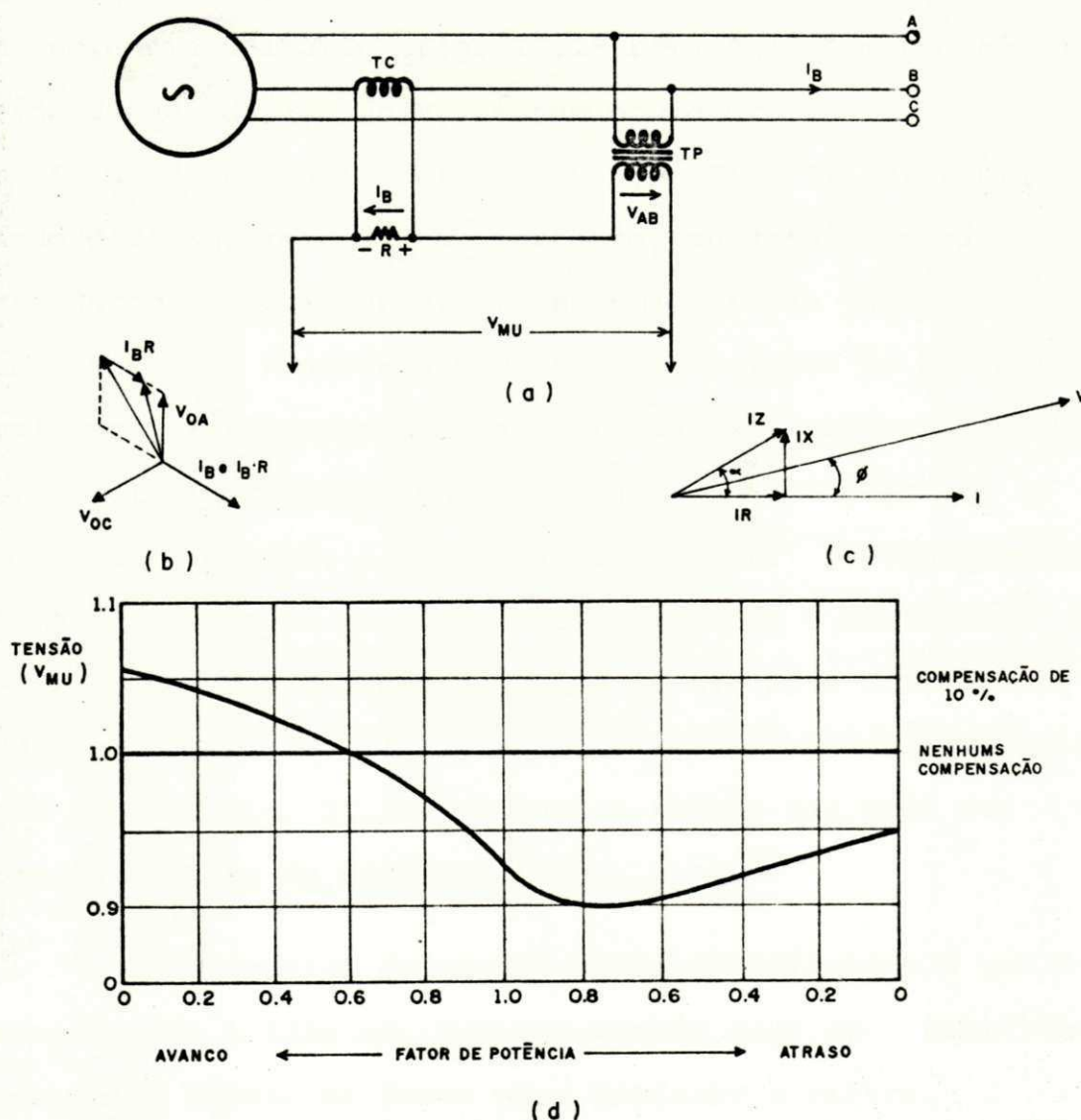


Fig. II.28 - Compensação de corrente ativa e reativa [04]

a.2) Compensador de Corrente Reativa

O compensador de corrente reativa proporciona um sinal para modificar a tensão do gerador a fim de que se tenha boa condição de se efetuar o paralelo do gerador à rede. Provavelmente, o arranjo mais comum é o da Fig. II.29a [20]. Um TP mede a tensão entre as linhas A e B e um TC, na linha C, produz uma queda de tensão nos terminais do resistor R, em fase com a corrente i_C . A tensão de saída, V_{MU} , é a soma da tensão V_{AB} com a queda de tensão RI_C . Para um fator de potência unitário (Fig. II.29.b) a queda em R está defasada de 90° da tensão V_{AB} e tem pouco efeito ($V_{AB} \cong V_{MU}$). Para fator de potência zero em avanço (Fig. II.29.c) RI_C é somado diretamente a V_{AB} e, portanto, aumenta a tensão de saída. Então o regulador atuará em uma direção tal que reduzirã a tensão e tenderã a restabelecer o fator de potência normal. Se o fator de potência se torna nulo em avanço (Fig. II.29.d) RI_C reduz a tensão de saída, o que acarreta um aumento da excitação e da tensão do gerador, restabelecendo o fator de potência da carga. Esse circuito é eficiente, permitindo uma compensação da ordem de 5%. Para diminuir a ondulação e permitir um filtro menor, pode-se usar uma ligação como da Fig. II.30, medindo a tensão das três mas com uma única fase de corrente [34].

Em geradores de grande porte justifica-se o uso de um compensador trifásico. Pode-se também usar um retificador com maior número de fases para diminuir o filtro.

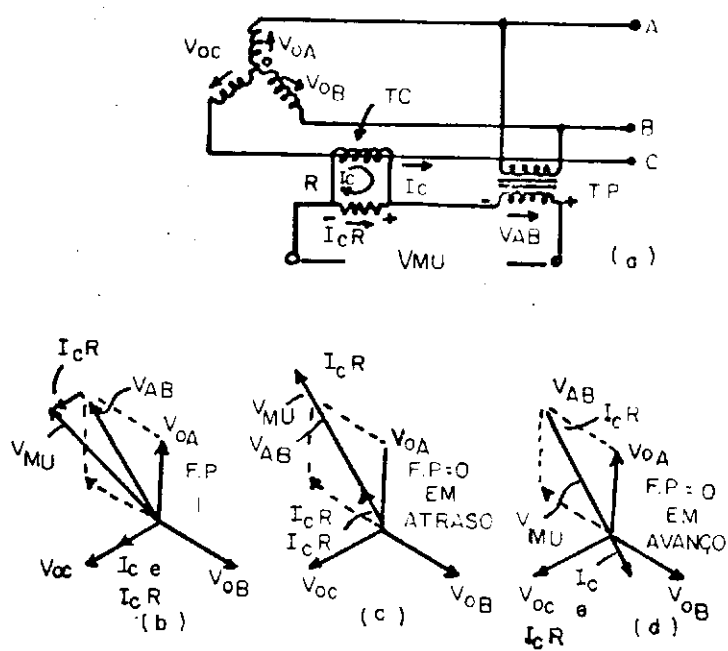


Fig. II.29 - Compensador de corrente reativa

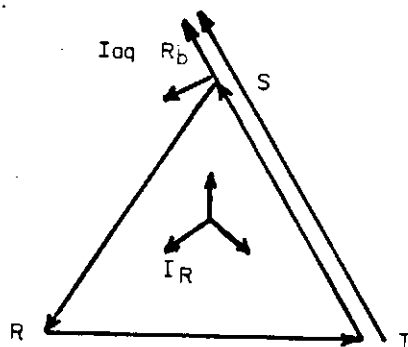


Fig. II.30 - Compensador de corrente reativa com medição nas três fases

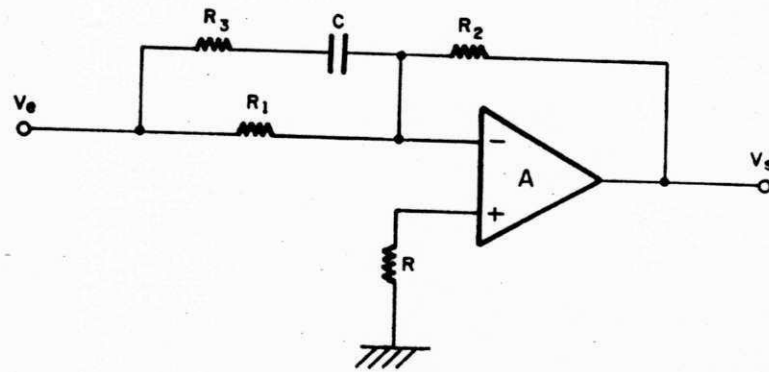


Fig. II.31 - Compensador em avanço

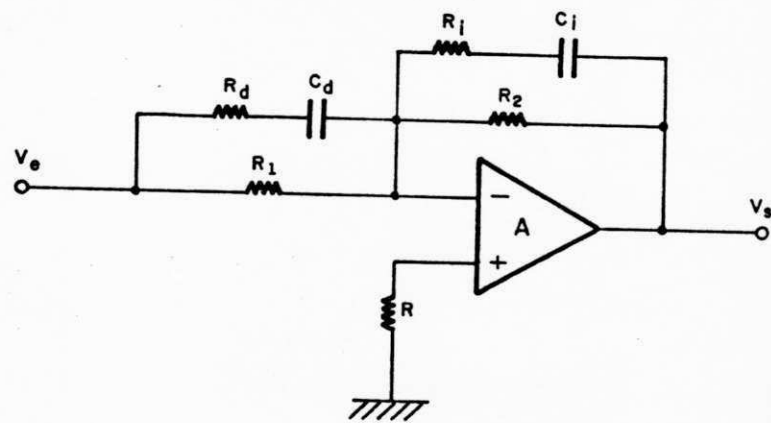


Fig. II.32 - Compensador em avanço-atraso

a.3) Estabilizador do Sistema de Controle da Excitação

Normalmente as respostas do regulador e do amplificador são muito rápidas e provavelmente sobreamortecidas. A resposta do sistema de excitação depende grandemente das constantes de tempo do gerador e da excitatriz, que são grandes. Mesmo para pequenos valores do ganho podem tornar o sistema instável. Isto pode ser melhorado pela adição de algum tipo de compensação que melhore o desempenho dinâmico do sistema de controle da excitação. Essa melhoria pode ser conseguida através de um compensador avanço ou avanço-atraso, como mostrado nas figuras II.31 e II.32.

b) Limitadores

Mesmo sob condições extremas, um gerador em paralelo com a rede deve permanecer em sincronismo, sem que a carga máxima permissível na máquina seja ultrapassada e sem que a proteção do sistema atue. Isso não pode ser garantido pela regulação automática de tensão isoladamente. A utilização ótima do gerador pode ser obtida somente se o regulador é influenciado adicionalmente por meios adequados de limitação de sobreexcitação e subexcitação [32]. O objetivo desses limitadores não é substituir a proteção do sistema. Apenas permitem um melhor uso da máquina síncrona dentro dos seus limites permissíveis de operação. Esses limites podem ser distinguidos na curva de capacidade de um turbo-gerador (Fig. II.33) [35].

O limite de potência ativa (linha CE) não é determinado pelo gerador em si, mas pela máquina que o aciona e por isso não entra em considerações no que se refere a limitadores de sistema de excitação.

Um fator ligado diretamente com a corrente de excitação é o aumento permissível de temperatura nos enrolamentos do rotor, que é representado pelo arco C e D com centro em A, correspondente à condição de não-excitação. Este limite térmico é definido pelo envelhecimento do isolamento.

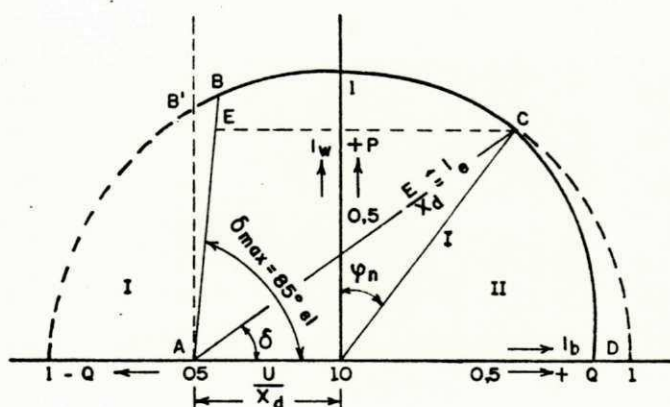


Fig. II.33 - Diagrama de potência e corrente de um turbo-gerador

$$U = U_k = 1 \text{ p.u.}$$

$$X_d = X_q = 2 \text{ p.u.}$$

$$\cos \psi_n = 0.8$$

I = Subexcitação

II = Sobreexcitação

AB = Limite prático de estabilidade

AB' = Limite de estabilidade de regime permanente

BC = Limite de aumento de temperatura do estator

CD = Limite de aumento de temperatura do rotor

CE	= Limite de potência ativa
E	= F.E.M. do rotor
I_b	= Corrente reativa
I_c	= Corrente de excitação
I_w	= Corrente ativa
P	= Potência ativa
Q	= Potência reativa
U_k	= Tensão terminal
X_d	= Reatância de eixo direto
X_q	= Reatância de eixo de quadratura
δ	= Ângulo de carga
ψ_n	= Ângulo de fase nominal

No modo de operação subexcitado, a operação da máquina síncrona é limitada pelo conjugado de entreferro necessário à transferência de potência ativa; a condição estacionária é definida por um ângulo de deslocamento do rotor definido e permissível (linha A - E). Este limite possui características mecânicas e dinâmicas e requer intervenção instantânea tão logo seja excedido, para evitar a saída de sincronismo da máquina.

Outra condição importante que governa os limites a serem introduzidos é a não interferência destes na operação normal do regulador de tensão.

Em resumo, os fatores que limitam o campo de operação dos geradores síncronos são os seguintes:

- 1 - Tensão terminal;

- 2 - Corrente de armadura (Corrente de estator);
- 3 - Corrente de campo (Corrente de rotor);
- 4 - Ângulo de carga (Ângulo do rotor);
- 5 - Capacidade da máquina primária.

Controladores do limite da excitação são utilizados em geradores síncronos que operam em paralelo com a rede de alimentação ou com outros geradores. Atuando em conjunção com o regulador de tensão, esses controladores asseguram a utilização ótima do gerador e melhoram a confiabilidade da operação em paralelo. Uma característica comum de todos os controladores de limite é que quando eles intervêm, influenciam o regulador de tensão e assim causam uma mudança correspondente na excitação [32].

A limitação das correntes de rotor e estator têm o efeito de reduzir a excitação na operação sobreexcitada, enquanto que a limitação do ângulo de rotor e da corrente de estator aumentam a excitação na operação subexcitada. As velocidades com as quais elas são aplicadas devem variar de forma adequada.

Nas condições de sobreexcitação, a limitação das correntes de estator e rotor devem intervir após um certo atraso com o objetivo de permitir sobreexcitação temporária. Isto não piora o comportamento do controle nos eventuais surtos de carga ou a estabilidade transitória da máquina quando ocorrem falhas na rede.

No modo subexcitado, a limitação do ângulo do rotor e da corrente do estator devem ocorrer instantaneamente e as

sim, pelo aumento imediato da excitação, evitam um aumento maior no ângulo do rotor o que poderia causar perda do sin cronismo do gerador.

O limitador do ângulo do rotor entra em ação quando a carga se torna acentuadamente capacitiva. Isto ocorre, por exemplo, durante períodos fora do pico em grandes redes urbanas, quando do carregamento leve das linhas de alta tensão. A linha AB na Fig. II.33, representa a faixa de influência do controlador do ângulo do rotor.

A limitação da corrente do estator no modo de operação subexcitado é virtualmente usada somente com capacitores sin cronos multipolos que operam com excitação negativa para au mentar a capacidade de absorção capacitiva.

O limitador da corrente do estator atua em duas re giões de operação do gerador: na região "sobreexcitado" o va lor teórico limite é definido por um potenciômetro e o seu valor corresponde ao ponto C da curva de capacidade da Fig. II.33. Os valores real e teórico são comparados e o si nal de diferença entre eles é amplificado. Através de um po tenciômetro, é dado um valor de corrente reativa, a partir do qual a limitação pode entrar em ação.

Se o gerador estiver subexcitado e trabalhando próxi mo ao fator de potência unitário, então a saída do amplifica dor é negativa e o integrador não entra em operação.

Se o gerador estiver sobreexcitado, a tensão é então positiva e seu valor depende da diferença entre o valor real

e o valor limite de corrente, bem como da corrente reativa, descontando-se o valor, no qual o potenciômetro estiver atuando.

Para a limitação na região "subexcitado", da mesma forma que foi descrito anteriormente, são comparados os valores real e teórico (este corresponde no caso, ao ponto B da curva de capacidade da Fig. II.33).

A saída do integrador será positiva, quando a corrente do gerador for maior do que a corrente limite definida, e o fator de potência, por exemplo, for menor do que 0,9 subexcitado. O sinal atuante terá então, a função de elevar a tensão.

O limitador da corrente do rotor, ou limitador da corrente de excitação atua através da comparação dos valores real e teórico da corrente de excitação. O valor da corrente de excitação é obtido através de um transdutor.

O limitador V/f tem por finalidade limitar a corrente no transformador (no caso de sobreexcitação), partindo-se do princípio que num transformador a corrente é proporcional à razão entre tensão e frequência. A atuação desse limitador se dá da seguinte forma: a tensão senoidal do gerador é reduzida, através de um TP, valor que é conduzido a um conversor tensão/frequência, cuja saída é uma tensão contínua proporcional à frequência. Este valor é comparado com uma tensão contínua que é proporcional à tensão do gerador. Quando esta for superior à tensão proporcional à frequência, o limitador

V/f atuará sobre o regulador de tensão via um regulador PI, havendo, todavia, indicação [14].

A Fig. II.34 apresenta em diagrama de blocos um regulador de tensão de um gerador síncrono adicionado dos limitadores.

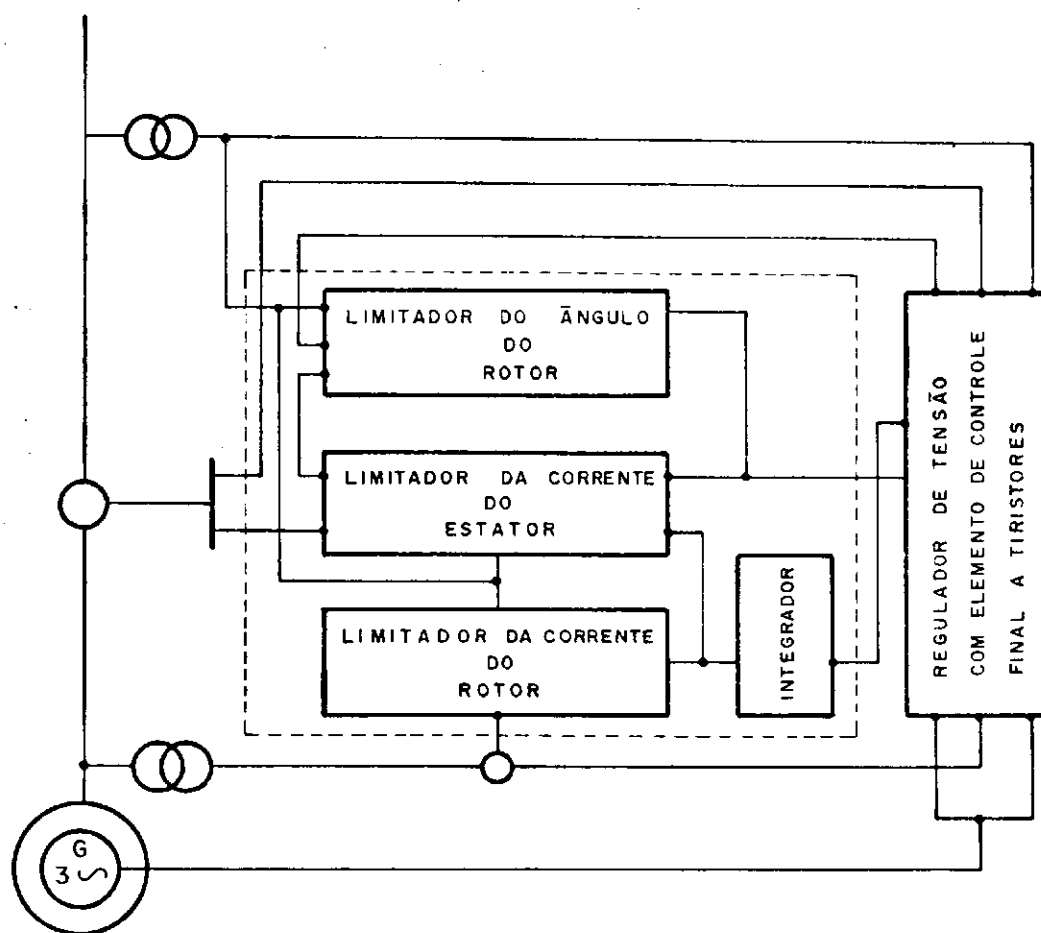


Fig. II.34 - Diagrama de blocos do circuito do sistema de regulação de tensão de um gerador síncrono adicionado dos limitadores [32].

c) Estabilizadores de Sistema de Potência (ESP)

A função dos estabilizadores de sistema de potência, é fornecer um sinal de controle suplementar à entrada do regulador de tensão da máquina síncrona, objetivando melhorar o desempenho dinâmico do sistema [09].

A tendência de aumento das reatâncias dos geradores síncronos e de maior carregamento dos sistemas tem levado à necessidade de utilização de sistemas de excitação de ganhos relativamente mais altos e de constantes de tempo bastante reduzidas, visando aumentar os limites de transferência de potência das usinas elétricas, sob o ponto de vista de estabilidade de transitória. Estas características de ganho elevado e rapidez de resposta são encontradas nos sistemas de excitação estáticos, atualmente de uso generalizado, e são necessárias para o aumento dos torques sincronizantes. Portanto, a utilização dos sistemas de excitação estáticos em substituição aos sistemas convencionais, empregando amplificadores rotativos, vem permitir um aumento significativo nos limites de estabilidade dos geradores síncronos, estendendo os efeitos dos torques sincronizantes, tanto sob operação normal quanto durante os transitórios resultantes de curto-circuito, abertura de linhas, etc... [48].

Observa-se, entretanto, que o uso de sistemas de excitação estáticos tem apresentado também, um decréscimo no amortecimento dos geradores nos sistemas de potência, podendo inclusive, levá-los à instabilidade. Neste caso a utilização de

sinais estabilizadores visa melhorar a estabilidade dinâmica, através de um aumento efetivo das componentes de amortecimento dos torques eletromagnéticos desenvolvidos pelos geradores síncronos.

Várias variáveis podem ser usadas para se obter o sinal estabilizador: a velocidade do rotor [28], a potência acelerante [26], a frequência [25] e outras. As vantagens e desvantagens dos diversos tipos de estabilizadores estão relacionados com o sinal de entrada escolhido e aos problemas de sua sintetização, aos problemas de geração de ruído na obtenção do sinal de entrada, aos problemas de amplificação das oscilações torcionais e das frequências subsíncronas [23, 48]. Qualquer dos tipos de sinal de entrada da função de transferência do estabilizador deve compensar as características de ganho e de fase do sistema de excitação, gerador e sistema de potência, os quais determinam o sinal de saída para a componente do torque elétrico que pode ser modulado através do controle da excitação [38].

Dentre os tipos de sinais mais usados, destacam-se a velocidade do eixo do gerador (ω), a potência acelerante (P_{ac}) e a variação de frequência (Δf) [23].

O ESP que utiliza a velocidade do eixo no gerador como entrada deve compensar o atraso no GEP (Gerador, Excitação, Sistema de Potência) e produzir uma componente de torque em fase com as mudanças de velocidade, assim como aumentar o amortecimento das oscilações do rotor. As técnicas usadas para se obter um sinal estabilizador a partir da veloci

dade do eixo de um gerador hidráulico são descritas na referência [51].

O ESP que utiliza a potência acelerante como entrada apresenta uma limitação com relação à potência mecânica de entrada da máquina, que deve ser considerada constante. Quando uma mudança na carga da máquina é exigida, às vezes torna-se necessário desconectar o ESP para evitar incursões excessivas da corrente de campo e da potência reativa do gerador, o que pode resultar na perda de estabilidade da máquina [26].

O uso da frequência terminal da máquina síncrona, ao invés da velocidade do eixo do gerador, como sinal de entrada do ESP tem a vantagem de reduzir a dependência do ruído elétrico e permite que o sinal estabilizador seja obtido com todos os componentes estáticos [25].

A Fig. II.35 mostra um diagrama de blocos típico de um ESP com qualquer das entradas, P_{ac} , w ou f .

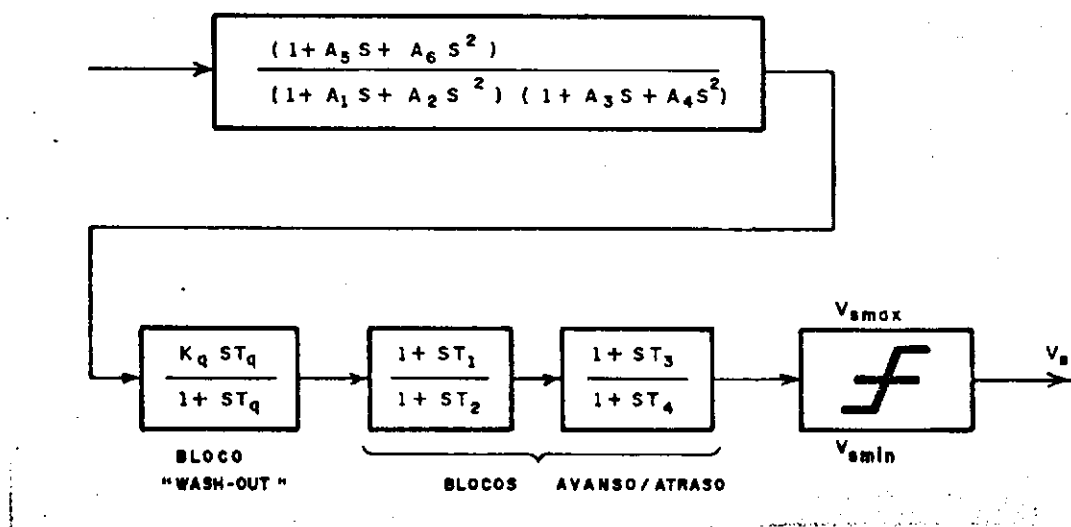


Fig. II.35 - Diagrama de blocos de ESP típico

O bloco referente aos filtros, representa uma função de transferência que inclui os efeitos do sinal de entrada do transdutor e qualquer outro filtro usado para atenuar o ganho do estabilizador das frequências torcionais no eixo turbina-gerador. Em estudos de estabilidade em computador digital, os filtros para alta frequências (acima de 3,0 Hz) não precisam ser representados [07].

O ganho do sinal estabilizador é representado pelo termo K_q .

O bloco "wash-out", caracterizado pela constante de tempo T_q , tem como função básica não permitir que as variações do sinal de entrada venham influenciar no controle da tensão terminal da máquina síncrona em regime permanente.

Os blocos avanço/atraso apresentam quatro constantes de tempo ajustáveis independentemente. As constantes de tempo em avanço servem para compensar o atraso de tempo inerente aos sistemas de controle da excitação. As constantes de tempo em atraso servem para representar o filtro referente ao ruído. Em geral a constante de tempo de atraso é cerca de 1/10 da constante de tempo de avanço [25].

A função de transferência, relacionando o sinal de saída e o sinal de entrada do ESP, após os filtros, é dada por:

$$Z(s) = \frac{k_q s T_q}{1+sT_q} \cdot \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \cdot \frac{1+sT_3}{1+sT_4} \quad (\text{II.24})$$

II.4 DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO

O conhecimento da função de transferência de cada componente do regulador do sistema de excitação, e a maneira pela qual são conectados, permite sua representação, com base na Fig. II.10. Por exemplo, um sistema que utiliza um regulador primário pode ser representado através do diagrama da Fig. II.36, cuja função de transferência entre E_{fd} e V_{ref} mostra ser este um sistema de terceira ordem.

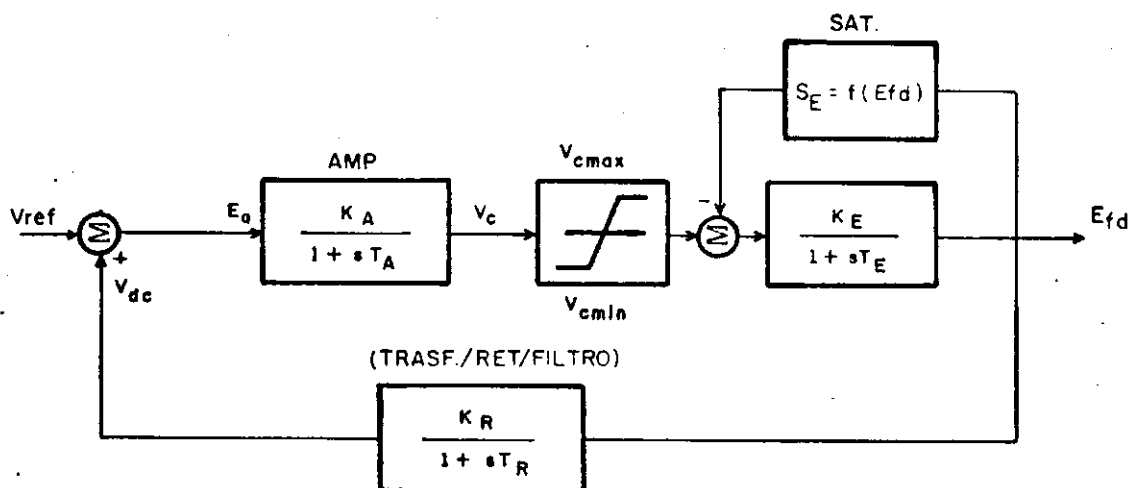


Fig. II.36 - Diagrama de blocos do sistema de controle da excitatriz (CA)

Função de transferência

$$\frac{E_{fd}}{V_{ref}} = \frac{K_A (1 + sT_R)}{(1 + sT_A) (1 + sT_R) (K_E + sT_R) + K_A K_R} \quad (II.15)$$

A representação do regulador completo é obtida pela adição de estabilizadores e sinais adicionais à tensão de referência e apresentada na figura II.37.

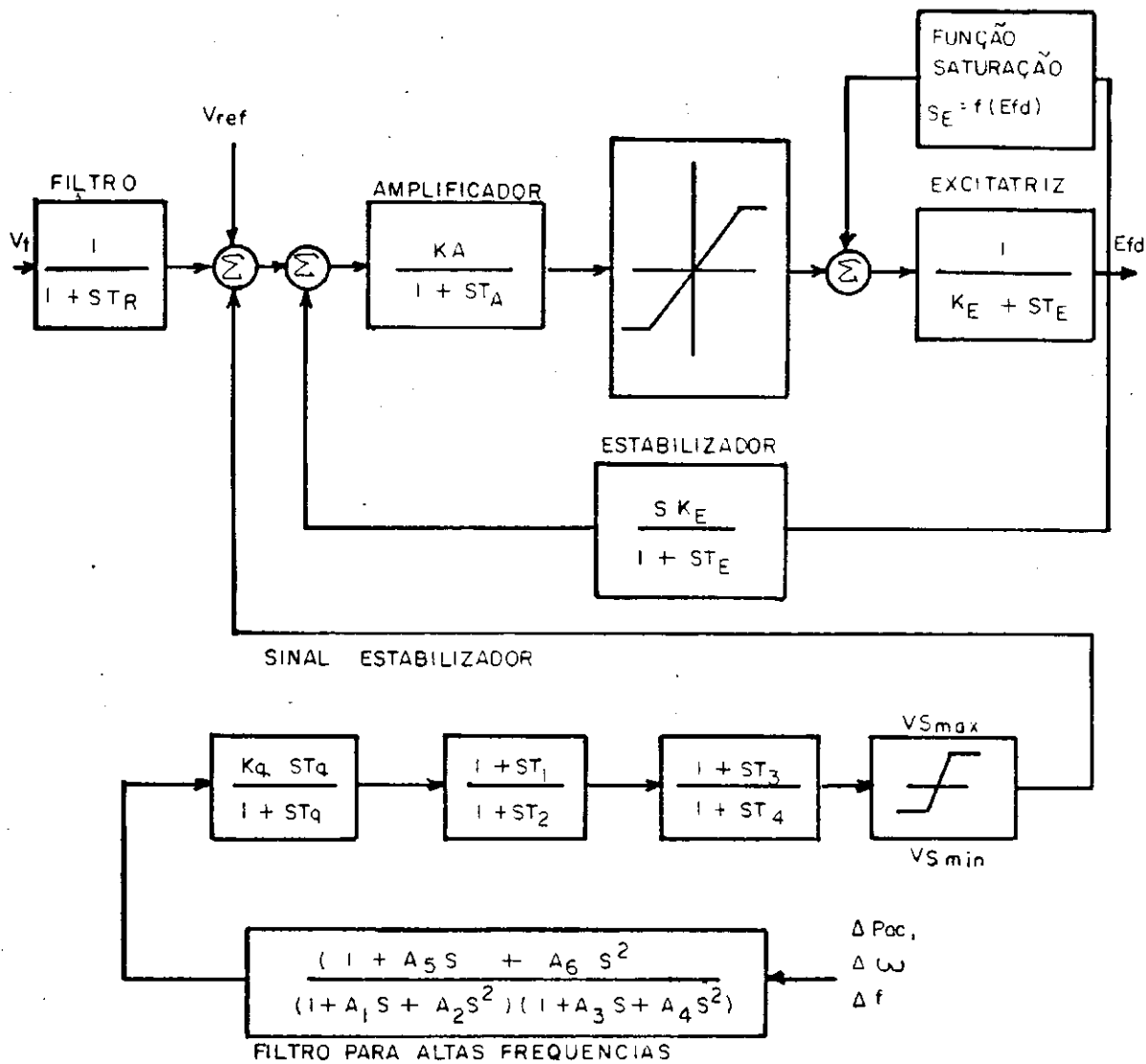


Fig. II.37 - Diagrama de blocos de um sistema de excitação incluindo o ESP

II.5 CONCLUSÃO

Este Capítulo apresenta os diferentes tipos de sistemas de excitação, discutindo os elementos componentes dos mesmos de uma maneira sistemática. Indica, ainda, como é possível se obter um modelo representativo de um dado sistema a partir das funções de transferência de cada elemento componente do mesmo e do conhecimento das conexões entre os mesmos. Tais modelos podem ser utilizados para a simulação e análise do sistema.

No próximo Capítulo são apresentados modelos existentes para os diferentes tipos de sistemas de excitação.

CAPÍTULO III

MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

III.1 INTRODUÇÃO

Até os anos 60, os estudos de estabilidade de sistemas de potência geralmente não levavam em consideração qualquer controle da excitação e os geradores síncronos eram representados por uma tensão constante atrás de uma reatância transitória, conhecido como modelo clássico; no entanto, quando se deseja uma análise mais detalhada da resposta do sistema ou o período de investigação se estende além de um segundo, torna-se importante incluir os efeitos da excitatriz e do regulador do sistema [03]. Portanto, tornando-se inadequado o modelo clássico, uma representação mais realística da máquina e do sistema de excitação deve ser feita.

No Capítulo anterior, foram vistos os diferentes tipos de sistemas de excitação, tendo sido examinadas as partes constituintes dos mesmos e indicado como se poderia, através do conhecimento das funções de transferência de cada parte componente, obter um modelo adequado à representação dos mesmos. Um outro caminho muito empregado pelas empresas e pesquisadores, na determinação dessas funções de transfe

rência, é obter tal modelo a partir de testes experimentais das respostas transitórias em frequência, tanto da excitatriz como de cada elemento do regulador [52, 53].

A fim de fornecer uma referência para fabricantes, usuários e analistas de sistemas, um Comitê do IEEE estabeleceu, em 1968, uma nomenclatura comum para os sistemas de excitação, apresentou modelos matemáticos básicos e definiu parâmetros para esses modelos [08].

Embora esses modelos ainda sejam adequados para o estudo de estabilidade de vários tipos de sistemas, muitos dos novos equipamentos desenvolvidos passaram a não mais se enquadrar naqueles modelos. Portanto, a necessidade de se representar adequadamente esses equipamentos, levou o IEEE, em 1981, a propor modelos que os representassem com detalhes suficientes [07].

Este Capítulo apresenta e discute tais modelos.

III.2 TIPOS BÁSICOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

A classificação inicial do IEEE agrupou os seguintes tipos de sistemas de excitação:

Tipo 1 - Sistema com excitatriz rotativa e regulador de ação contínua.

Tipo 2 - Sistema com retificador rotativo.

Tipo 3 - Sistema estático com alimentação de tensão e corrente terminais.

Tipo 4 - Sistema com regulador de ação não contínua.

Nos modelos desses tipos de sistemas é empregado, por conveniência, o sistema por unidade: a tensão nominal do gerador é definida como 1 pu de tensão do gerador e 1 pu de tensão de saída da excitatriz corresponde à tensão necessária para produzir a tensão nominal do gerador na linha de entreferro.

III.2.1 SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 1

a) Caso básico: Sistema com regulador de ação contínua e excitatriz

Este tipo representa a maioria dos sistemas de excitação de ação contínua com excitatrizes rotativas, incluindo os sistemas com excitatrizes CC e CA com retificador estático não controlado, cujos diagramas funcionais foram indicados nas figuras II.1a, b e c. Alguns desses sistemas, fabricados industrialmente, são:

Brown Boveri - Regulador Unitrol

Allis Chalmer - Regulador Regulex

General Electric - Regulador Alterrex

Alterrex-Tiristor

Westinghouse - Regulador WMA Mag-A-Stat
 Rototrol
 Regulador Silverstat
 Regulador TRA

A figura III.1 mostra em diagramas de blocos um modelo que serve para representação computacional de sistemas de excitação que se enquadram no tipo 1.

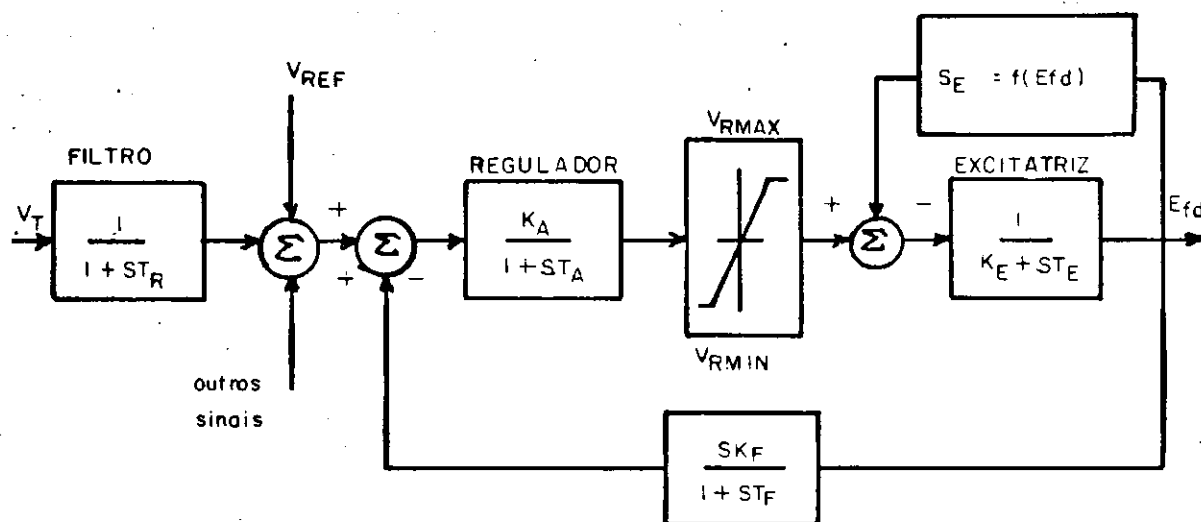


Fig. III.1 - Sistemas de excitação tipo 1, regulador de ação contínua e excitatriz

A função de transferência do sistema de excitação tipo 1 pode ser determinada a partir das seguintes informações: A tensão terminal do gerador V_T é aplicada à entrada do regulador através de um filtro, representado pela constante de tempo T_R . Para a maioria dos sistemas, T_R é bastante pequena e pode ser considerada zero.

O primeiro somatório compara a referência do regula

dor com a saída do filtro, que juntamente com outros sinais, estabelece um sinal de erro de tensão na entrada do regulador.

O segundo somatório combina o sinal de entrada de erro de tensão com o sinal proveniente da malha externa de realimentação.

A função de transferência do regulador principal é representada pelo ganho K_A e a constante de tempo T_A . Segue-se a esse bloco, um limitador de máximo e mínimo imposto ao regulador de modo a evitar que valores elevados de sinal de erro possam produzir uma saída do regulador que excede os limites práticos.

O terceiro somatório subtrai um sinal que representa a função de saturação, $S_E = f(E_{fd})$, da excitatriz. O resultado é aplicado à função de transferência da excitatriz: $1/(K_E + ST_E)$.

A malha externa de realimentação é representada pela função de transferência $SF_F/(1 + ST_E)$, cuja entrada é E_{fd} e cuja saída está no somatório.

b) Caso especial (tipo 1s): Sistemas com retificadores controlados e com alimentação a partir da tensão terminal

Nesse tipo estão incluídos os sistemas com excitação estáticas como por exemplo:

General Electric - Althyrex, e outros

Westinghouse - WTA.Trinistat

Brown Boveri - Vários utilizando o regulador UNITROL
[50]

Siemens - Thyripol [14]

Nesses sistemas, a tensão máxima do regulador não é mais uma constante, mas passa a ser proporcional à tensão V_t , isto é: $V_{RMAX} = K_p V_t$.

Em geral, as constantes para o sistema de excitação tipo 1s, referindo-se à Fig. III.1, são tais que: $K_E = 1$, $T_E = 0$ e $S_E = 0$.

III.2.2 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO TIPO 2

O sistema de excitação tipo 2 (Fig. III.2) é um sistema com retificadores girantes. Nesse tipo, entre outros, podem ser incluídos: o sistema "Brushless" da Westinghouse e o sistema WBT da Brown Boveri.

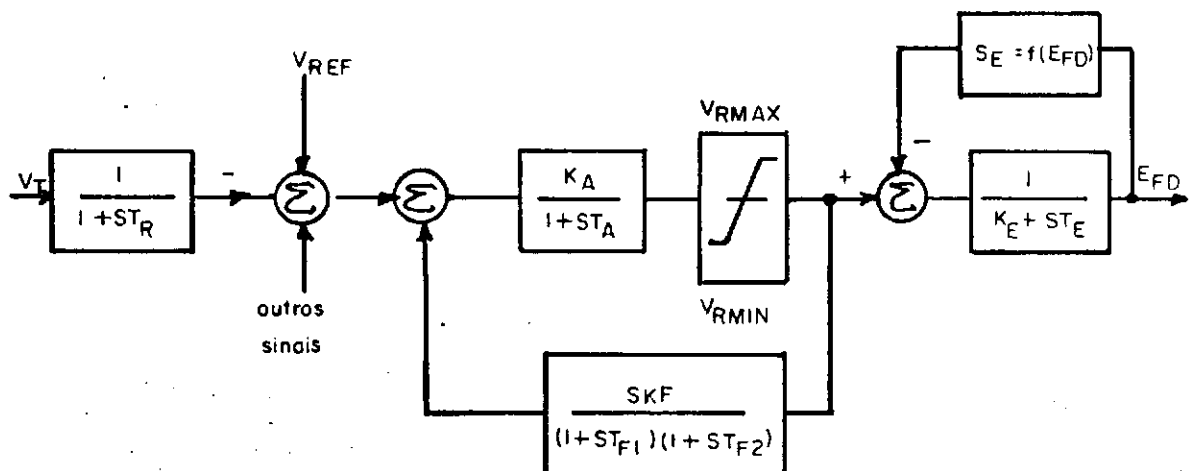


Fig. III.2 - Sistema de excitação tipo 2, sistema de retificador rotativo

Como o sistema é sem escovas, a tensão de excitação E_{fd} não se presta mais à realimentação e, portanto, a função de transferência será acrescida de uma constante de tempo T_{F2} , na malha de realimentação, para compensar a ausência do amortecimento da excitatriz. Observe-se também que essa malha de realimentação terá sua entrada a partir da saída do regulador. As demais características do sistema tipo 2 são idênticas às do tipo 1.

III.2.3 SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 3

Alguns sistemas de excitação usam uma combinação de tensão e corrente terminal como sinais de realimentação a serem comparadas com o sinal de referência, como por exemplo: sistema de excitação estático SCPT (General Electric e sistema de excitação estático WTA-PCV (Westinghouse) [01]; esses sistemas não podem ser representados de forma adequada pelos tipos 1 ou 1s. Para representar esses sistemas um diagrama de blocos é apresentado na Fig. III.3.

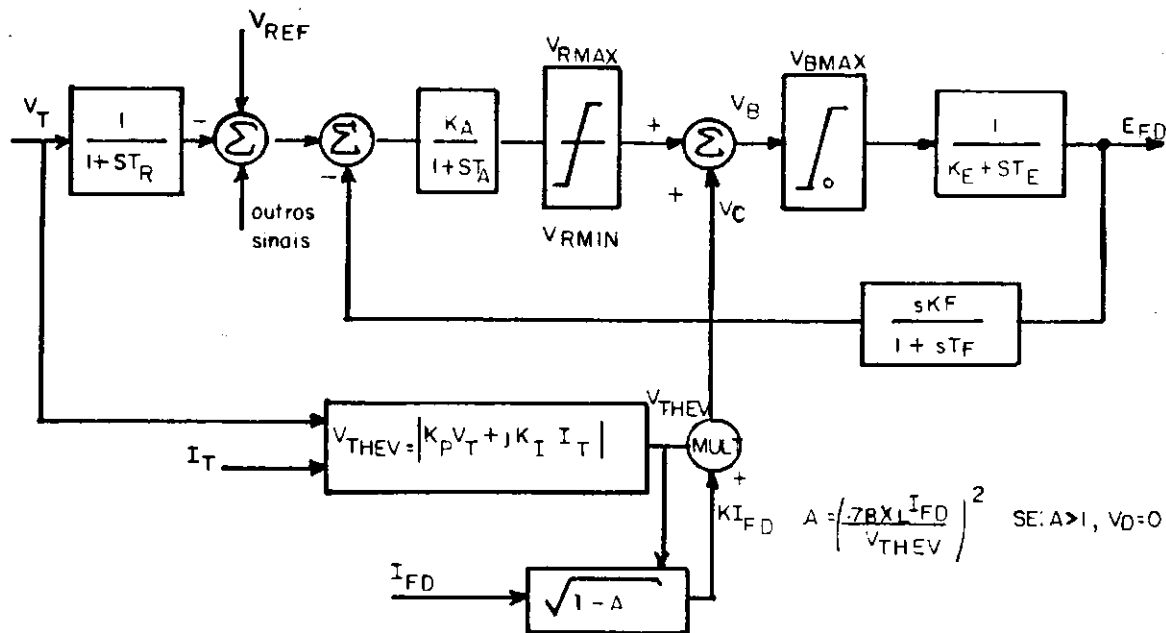


Fig. III.3 - Sistema de excitação tipo 3, sistema estático com alimentação de tensão e corrente terminais

A função de transferência do regulador é semelhante à do tipo 1. Entretanto, seu sinal de saída incorpora informações provenientes de V_t , I_t e I_{fd} , representadas pelo sinal V_c . Logo, V_c representa a auto-excitação dos terminais do gerador. As constantes K_p e K_i são fatores de proporcionalidade das componentes da "tensão de Thevenin", V_{TH} , vista dos terminais da máquina que relaciona as informações de tensão e corrente. O multiplicador (MULT) multiplica o sinal V_{TH} pelo sinal $K_I I_{FD}$, proporcional à corrente de campo I_{FD} , os quais levam em conta a variação da auto-excitação com a mudança na relação angular da corrente de campo (I_{FD}) e a tensão de auto-excitação (V_{TH}) [01, 08]. A reatância X_L é a reatância de

comutação do transformador e está relacionada com o desempenho dos circuitos retificadores.

O limitador V_{Bmax} faz a saída do sistema de excitação igual a zero quando $A > 1$, ou seja, quando a corrente de campo excede a corrente de saída de excitação. Nesse caso, o excesso de corrente de campo do gerador é desviado da fonte de excitação através da saída do retificador [08].

III.2.4 SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 4

Os sistemas descritos nos ítems anteriores possuem duas coisas em comum: ganhos relativamente altos e rápida velocidade de resposta. O sistema de excitação tipo 4 (Fig. III.4) é representado dos sistemas mais antigos, em particular daqueles em que os sistemas de regulação de tensão eram de ação não-contínua. Alguns desses sistemas são empregados ainda hoje, como por exemplo:

Westinghouse - Regulador BJ30

General Electric - Regulador GFA4

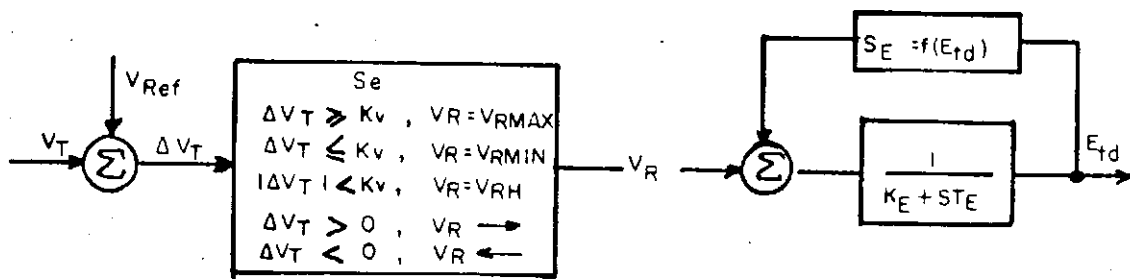


Fig. III.4 - Sistema de excitação tipo 4, regulador de ação não-contínua

Nota: V_{RH} é limitada entre V_{RMIN} e V_{RMAX} ; a constante de tempo do reostato é T_{RH} .

IIII.2.5 CONSIDERAÇÕES

Como já mencionado, fabricantes e analistas de sistemas de potência desenvolveram modelos de sistemas de excitação a partir de testes experimentais. Alguns desses modelos obtidos se enquadram imediatamente nos tipos do IEEE, outros necessitam simplificações ou alguma manipulação matemática para poderem ser enquadrados, outros não se enquadram muito bem e outros, mais modernos, simplesmente não se enquadram. Alguns desses casos são discutidos a seguir.

1 - Modelos perfeitamente enquadráveis

A Fig. III.5 mostra a função de transferência de um sistema de excitação estático Hitachi, alimentado a partir da tensão terminal do gerador, que se adapta ao modelo tipo 1s do IEEE [43]. Onde $V_{RMAX} = K_p V_t$ e $V_{RMIN} = K_d V_t$.

A exemplo do sistema Hitachi, outros sistemas, de outros fabricantes podem ser indicados [09].

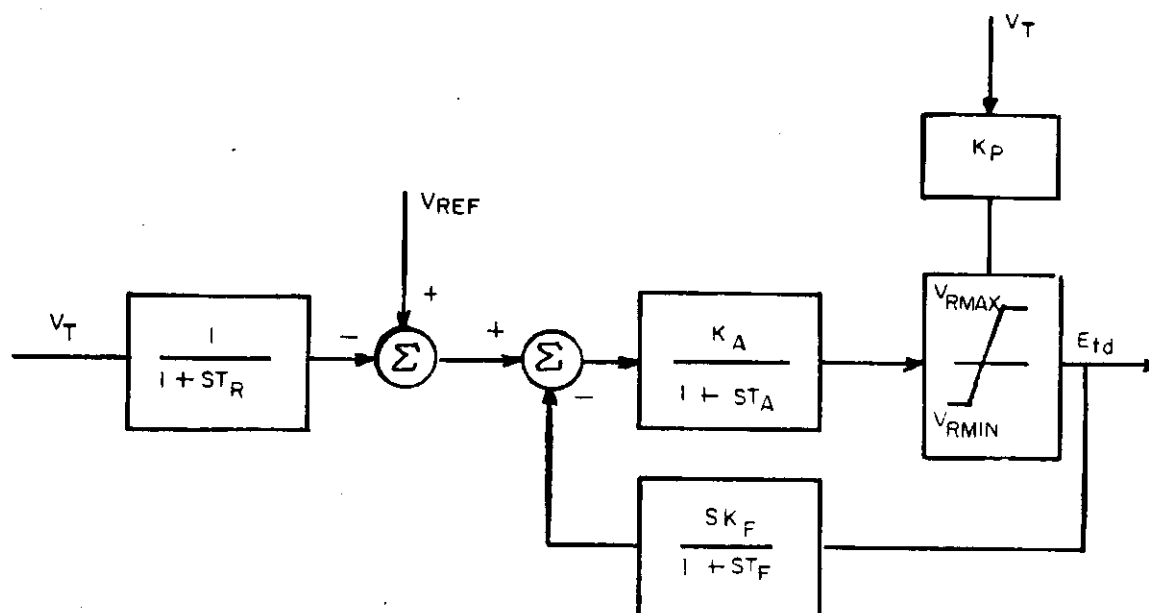


Fig. III.5 - Sistema de excitação estático HITACHI.

2. Modelos com enquadramento não imediato

A figura III.6 mostra a função de transferência do sistema de excitação estático Bown Boveri, tipo UNITROL, e equipado com um controlador PID (Proporcional, Integral, Diferencial). A função de transferência indicada nessa figura possui uma estrutura versátil, podendo se adaptar a diferentes exigências. Uma comparação entre este sistema de excitação e o modelo tipo 1 do IEEE pode ser feita:

A função de transferência do modelo tipo 1 do IEEE, retirada a excitatriz, isto é, $K_E = 1$ e $T_E = 0$ (fonte de excitação a partir dos terminais do gerador) é dada por:

$$F(s) = \frac{K_A (1+sT_F)}{(1+sT_A) \cdot (1+sT_F) + K_A S K_F} \quad (III.1)$$

Considerando a constante de tempo do regulador de tensão desprezível, $T_A = 0$

$$F(s) = \frac{K_A (1+sT_F)}{1+s(T_F+K_A K_F)}$$

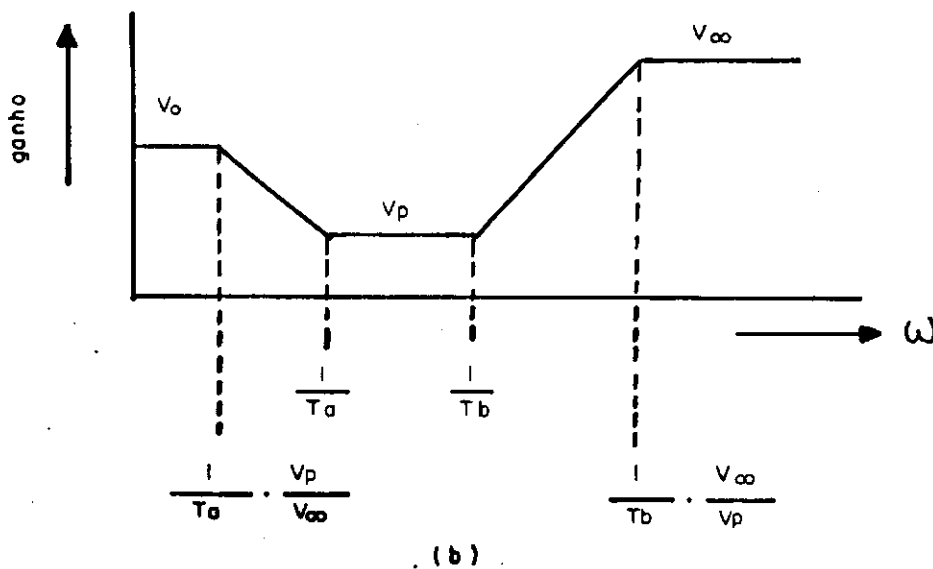
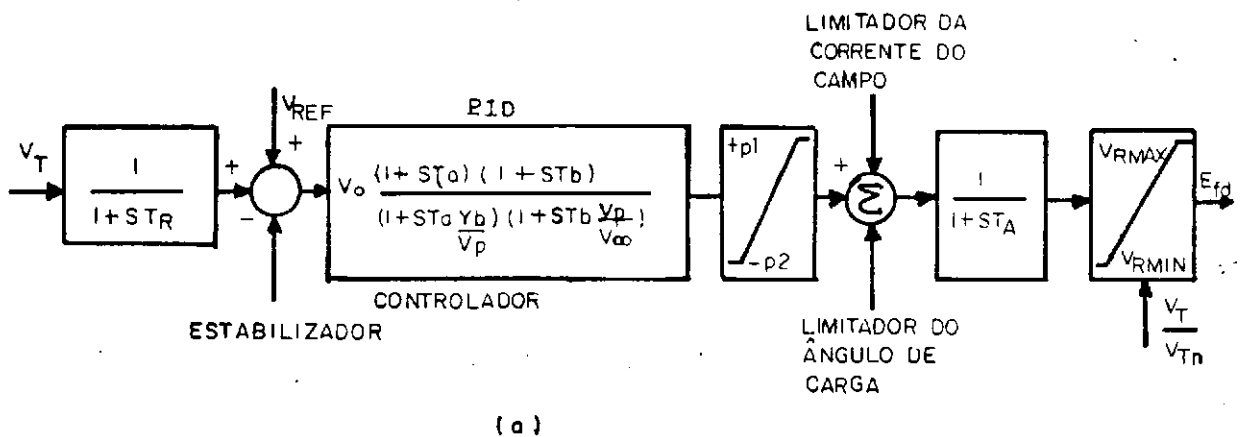
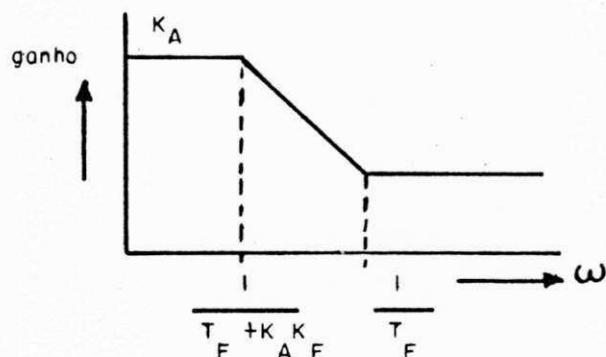


Fig. III.6 - Sistema de excitação estático BBC tipo UNITROL

(a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de Bode

Após as considerações feitas, o diagrama de bode do modelo tipo 1 modificado fica sendo:



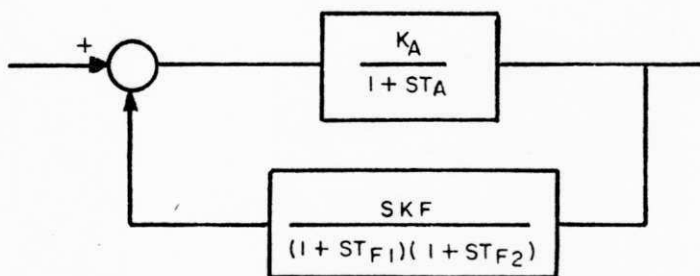
Fazendo-se a comparação entre esse diagrama e aquele da BBC (Fig. III.6b), tem-se:

$$K_A = V_o \tag{III.3}$$

$$T_F = T_a \tag{III.4}$$

$$T_F + K_A K_F = T_a \frac{V_o}{V_p} \quad K_F = T_a \left(\frac{V_o - V_e}{V_o \cdot V_p} \right) \tag{III.5}$$

A função de transferência do modelo tipo 2 (IEEE) sem a excitatriz:



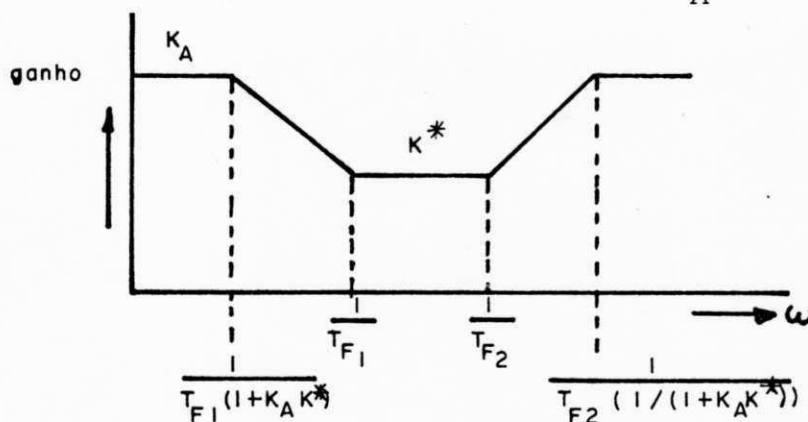
$$F(s) = \frac{-K_A (1+sT_{F1}) (1+sT_{F2})}{(1+sT_A) (1+sT_{F1}) (1+sT_{F2})} \frac{K_A \cdot sK_F}{(1+sT_A)} \tag{III.6}$$

A constante de tempo do regulador de tensão é desprezível, $T_A = 0$. Com $K_F = K^* T_{F1}$:

$$F(s) = \frac{-K_A (1+sT_{F1}) (1+sT_{F2})}{(1+sT_{F1}) (1+sT_{F2}) + K_A K^* sT_{F1}} \quad (\text{III.7})$$

Com boa aproximação, pode ser escrita como:

$$F(s) = \frac{-K_A (1+sT_{F1}) (1+sT_{F2})}{1+sT_{F1} (1+K_A K^*) \quad 1+sT_{F2} \left(\frac{1}{1+K_A K^*}\right)} \quad (\text{III.8})$$



Comparando a função de transferência anterior com a quela do sistema UNITROL, tem-se:

$$K_A = V_O \quad (\text{III.9})$$

$$T_{F1} = T_a \quad (\text{III.10})$$

$$T_{F2} = T_b \quad (\text{III.11})$$

$$(1+K_A K^*) = \frac{V_O}{V_p} \quad (\text{III.12})$$

$$\frac{1}{1+K_A K^*} = \frac{V_D}{V_\infty} \quad (\text{III.13})$$

Resolvendo as equações (III.12) e (III.13):

$$\frac{V_o}{V_p} = \frac{V_{oo}}{V_p} \quad V_o = V_{oo} \quad (\text{III.14})$$

e substituindo $K^* = K_F/T_{F1} = K_F/T_a$ na equação II.12, tem-se

$$K_F = T_a \left(\frac{V_o - V_p}{V_o \cdot V_p} \right) \quad (\text{III.15})$$

Uma observação importante é que a representação para o regulador de tensão UNITROL é aplicável em estudos de estabilidade para oscilações de potência na faixa de frequência de:

$$w = 0 \text{ até } w = \frac{1 + K_A K_f (1/T_{F1})}{T_{f2}} \text{ rad/s}$$

A título de exemplo, com valores numéricos, a figura III.7 mostra as características dinâmicas de um sistema de excitação com resposta inicial rápida e a sua adaptação ao modelo tipo 1 do IEEE (Fig. III.8). No caso, através da adição de uma realimentação e redução da constante de tempo efetiva da excitatriz, um sistema convencional de excitação sem escovas, com retificadores controlados, foi transformado em um sistema de resposta rápida [20].

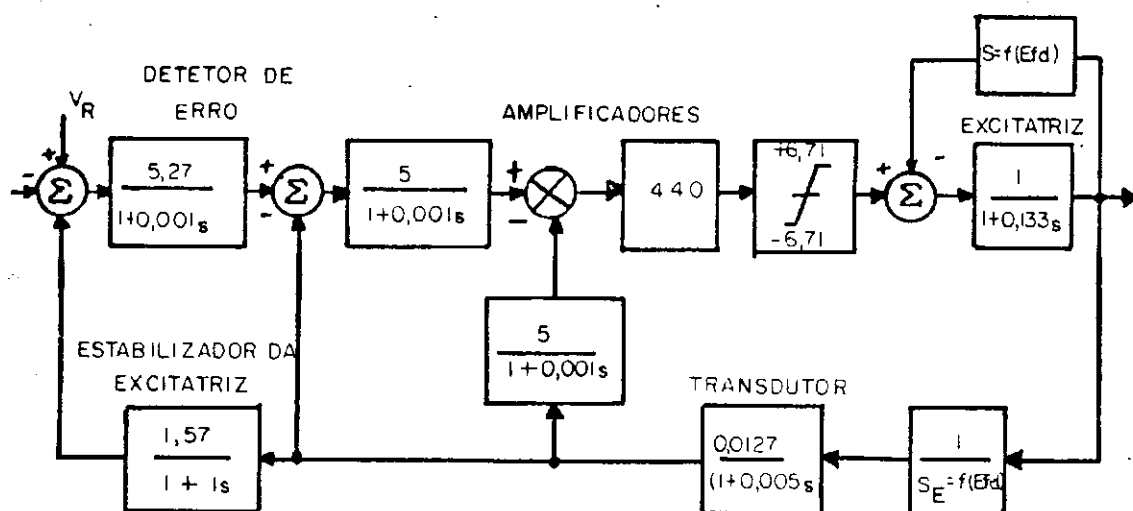


Fig. III.7 - Características dinâmicas do sistema de excitação

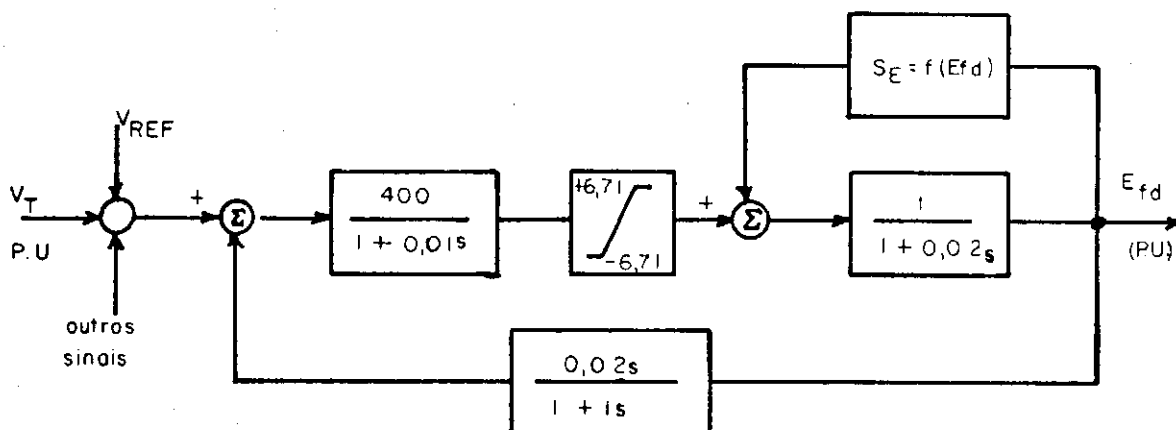


Fig. III.8 - Representação do sistema tipo 1 - IEEE

3) Modelos não enquadráveis

A Fig. III.9 mostra o diagrama de blocos de um sistema de excitação a tiristor ASEA utilizável como representação para estudos com computador. Infelizmente, este sistema estático não se enquadra muito em nenhum dos 4 tipos básicos recomendados pelo IEEE [43]; sendo observado no diagrama a

presença de compensador proporcional integral.

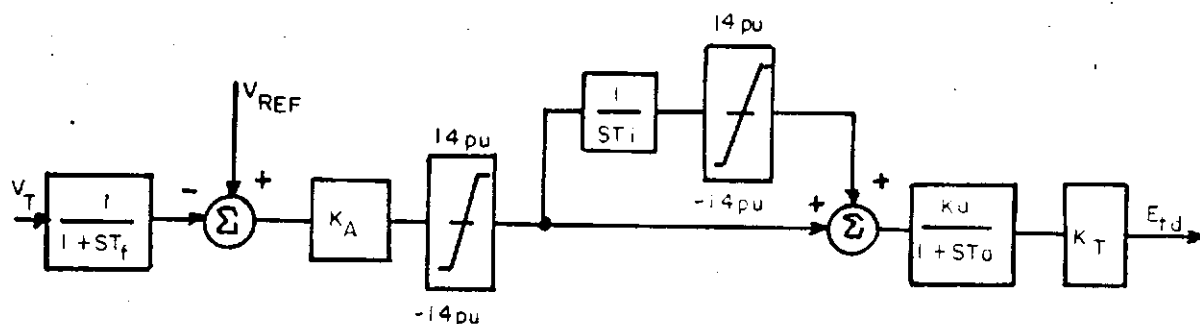


Fig. III.9 - Sistema de excitação a tiristor ASEA

Um outro exemplo de não enquadramento, é do sistema de excitação estático tipo UNITROL (BBC) com circuito "Compound", que apesar de usar tensão e corrente do terminal do gerador não se enquadra no modelo tipo 3 do IEEE [54].

III.3 NOVOS MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Conforme indicado, anteriormente, vários sistemas de excitação, não podem ser adequadamente representados pelos modelos básicos do IEEE [08]. Essa necessidade de melhor representar os sistemas de excitação levou o IEEE, através de um novo Comitê, a apresentar modelos para os novos tipos de equipamentos de excitação, não incluídos anteriormente, assim como modelos melhorados para equipamentos antigos, refletindo o conhecimento atual e práticos de modelagem. O relatório desse estudo identifica três tipos distintos de sistemas

de excitação com base na fonte de potência da excitação: ti
po CC, tipo CA e tipo ST.

III.3.1 TIPO CC - SISTEMAS COM EXCITATRIZES ROTATIVAS DE COR RENTE CONTÍNUA COM COMUTADOR

Sistemas já ultrapassados que têm dado lugar aos sis
temas de excitação com excitatrizes CA e estáticas, muito em
bora existam atualmente muito desses sistemas ainda em servi
ço.

a) Tipo CCl

A Fig. III.10 apresenta o modelo representativo de
sistemas de excitação com excitatrizes de corrente contínua,
controladas pelo campo por reguladores de ação contínua (es
pecialmente reostatos de ação direta, amplificadores magnéti
cos e amplificadores rotativos).

A entrada principal desse modelo é o sinal de erro
 V_{ERR} , do terminal do transdutor da tensão terminal do gera
dor e do compensador de carga.

No primeiro somador, o sinal estabilizador da excita
triz é subtraído, enquanto que o sinal do estabilizador do
sistema de potência é adicionado ao sinal de erro V_{ERR} . Em
regime permanente os dois primeiros sinais são zero.

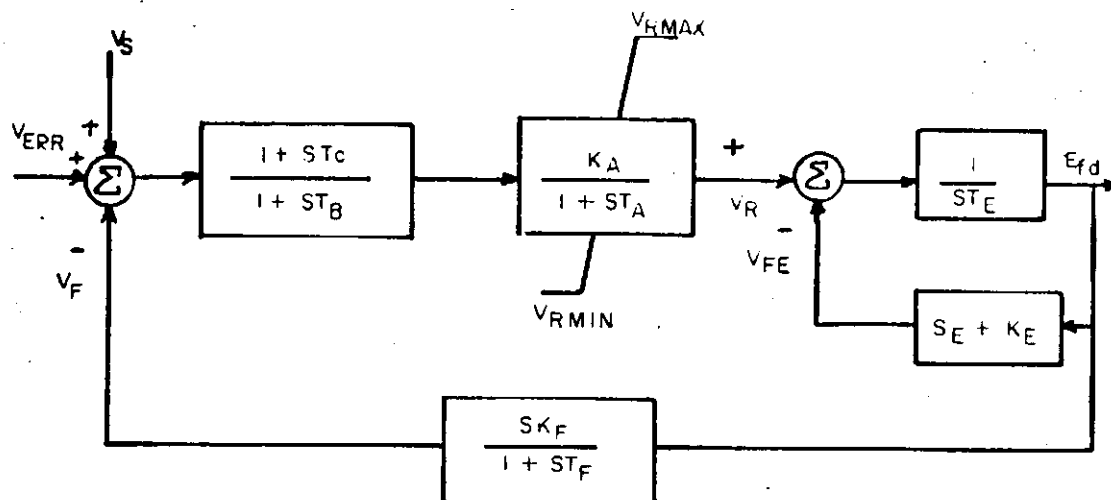


Fig. III.10 - Diagrama de blocos do modelo do sistema de excitação tipo CCl. Excitatriz CC com comutador

Comparando o diagrama de blocos da Fig. III.10, do modelo de sistema de excitação tipo CCl, com o diagrama de blocos da Fig. III.1, do modelo de sistema de excitação tipo 1, verifica-se uma semelhança quase que perfeita, a menos do bloco que contém as constantes de tempo T_B e T_C , na figura III.10. Na realidade essas constantes, utilizadas no modelo equivalente do sistema tipo CCl, são constantes inerentes ao regulador de tensão e frequentemente são bastante pequenas a ponto de poderem ser consideradas, como dados de entrada, igual a zero.

A tensão de saída do regulador, V_R é usada para controlar a excitatriz, que pode ser auto-excitada ou excitada em separado conforme foi discutido no Capítulo anterior.

b) Tipo CC2

A Fig. III.11, mostra o diagrama de blocos de modelo de sistema de excitação tipo CC2. Esse modelo difere do tipo CC1 somente no que se refere ao regulador de tensão, com relação aos limites, que agora são proporcionais à V_T . Caracterizando a substituição, por retificadores controláveis, de antigos equipamentos mecânicos ou amplificadores rotativos.

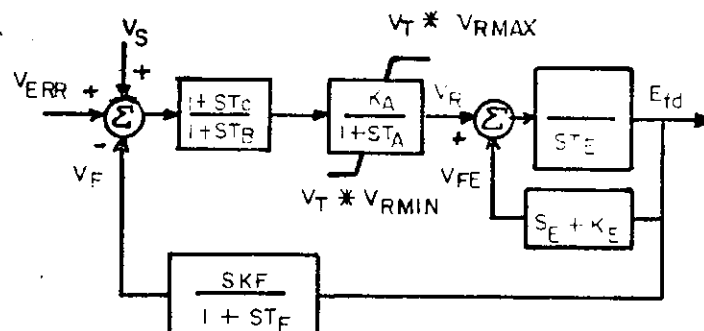


Fig. III.11 - Tipo CC2 - Excitatriz CC com comutador

c) Tipo CC3

A Fig. III.12 mostra o diagrama de blocos do modelo de sistema de excitação tipo CC3, que é usado para representar velhos sistemas de excitação, em particular aqueles com excitatrizes rotativas CC com comutador e reguladores de ação não-contínua.

Nesses sistemas a tensão de entrada da excitatriz, V_R , vai depender da magnitude do sinal de erro de tensão V_{ERR} , conforme indica o bloco lógico anterior ao ponto de so

matório da excitatriz.

Comparando o diagrama de blocos do sistema tipo CC3, com a classificação anterior do IEEE, verifica-se que o mesmo é uma nova representação do sistema de excitação tipo 4, mostrado na Fig. III.4.

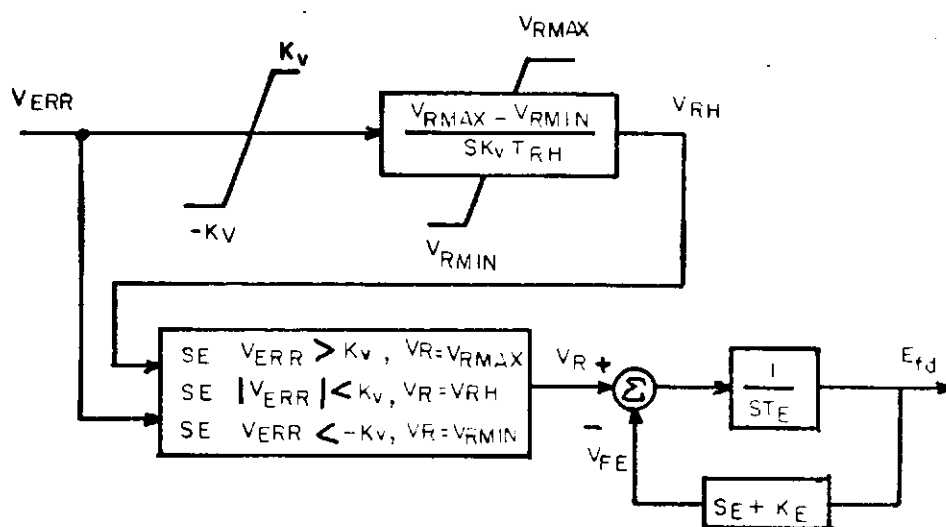


Fig. III.12 - Tipo CC3 - Excitatriz rotativa com reguladores de ação não-contínua

No modelo do sistema tipo CC3, a representação da excitatriz é a mesma dos tipos CC1 e CC2, no entanto, verifica-se que nenhum estabilizador do sistema de excitação é representado.

Um valor típico de K_v é 5%.

III.3.2 TIPO CA - SISTEMAS DE EXCITAÇÃO COM ALIMENTAÇÃO ATRAVÉS DE ALTERNADOR E RETIFICADOR

Esses sistemas usam um alternador CA e retificadores para fornecer a corrente contínua necessária à excitação do campo do gerador. Os retificadores podem ser controlados ou não-controlados; estacionários ou rotativos com relação ao eixo do alternador. Já o alternador, pode ser acionado por um motor em separado ou pelo próprio eixo da máquina síncrona.

a) Tipo CA1

A Fig. III.13 apresenta o diagrama de blocos do sistema de excitação tipo CA1, que consiste de um alternador como excitatriz principal com retificadores não-controláveis. A característica do diodo na saída da excitatriz impõe um limite inferior igual a zero na saída de tensão da excitatriz. Esse modelo é aplicável à simulação do desempenho de sistemas de excitação sem escovas da Westinghouse [07, 12].

O efeito desmagnetizante da corrente de carga (I_{FD}) sobre a tensão de saída da excitatriz (V_E) é levado em conta através do ramo de realimentação que inclui a constante K_D . Essa constante é uma função das excitatrizes e reatâncias transitórias [12, 20].

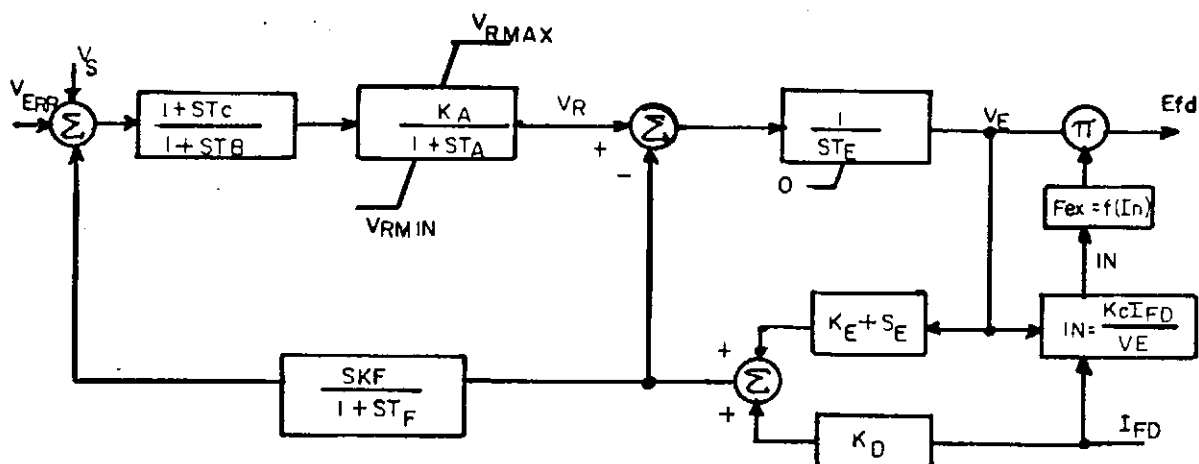


Fig. III.13 - Tipo CA1 - Sistema de excitação alternador-re_ tificador com retificadores não-controláveis e realimentação a partir da corrente de campo da excitatriz

b) Tipo CA2

A Fig. III.14 mostra o diagrama de blocos para o modelo do sistema de excitação tipo CA2, que representa um Sistema de Alta Resposta Inicial com o campo do alternador alimenta_ do por retificadores controlados. O tipo CA2 é igual ao tipo CA1, exceto pela inclusão de dois ramos adicionais de corren_ te de campo da excitatriz, simulando a compensação da cons_ tante de tempo da excitatriz e os elementos limitadores de sua corrente de campo. Esse modelo é aplicável a simulações do desempenho de Sistemas de Excitação sem Escovas de Alta Resposta Inicial da Westinghouse [20].

Para se obter alta resposta inicial com esse sistema, uma tensão bastante alta (V_{RMAX}) é aplicada ao campo da ex_

citatriz. Através do limitador da corrente de campo da excitatriz, a tensão de saída da excitatriz (V_E) é limitado a um valor (V_{LR}) que é geralmente determinado pela razão de resposta especificada do sistema da excitação. Os sinais do regulador de tensão (V_A) e os elementos de compensação da constante de tempo (V_H) são comparados com o sinal da saída (V_L) do limitador no circuito lógico de controle.

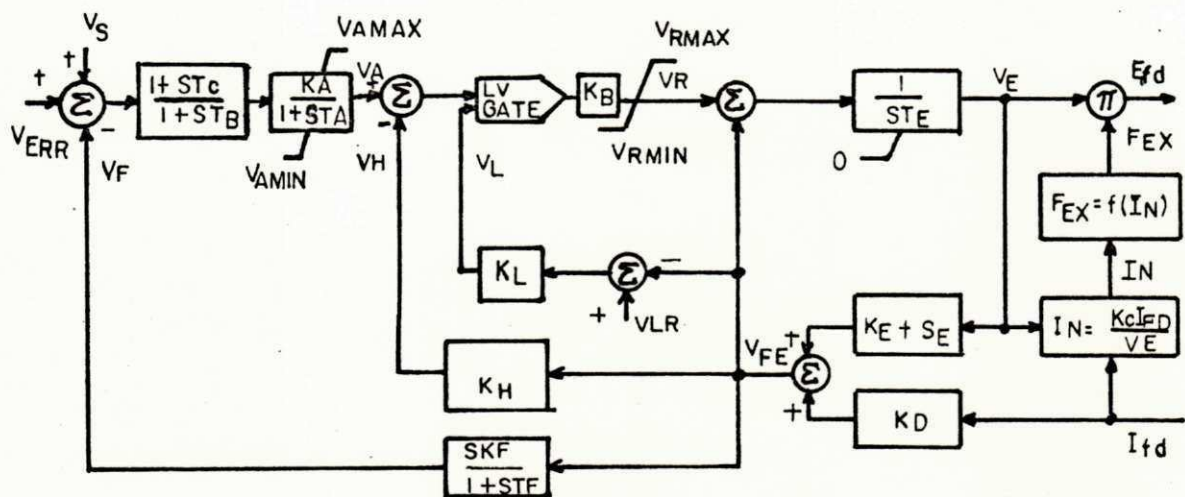


Fig. III.14 - Tipo CA2 - sistema de excitação alternador-retificador, de alta resposta inicial com retificadores não-controláveis e realimentação a partir da corrente de campo da excitatriz

c) Tipo CA3

A Fig. III.15 mostra o diagrama de blocos para o modelo do sistema de excitação tipo CA3, que representa um sistema de excitação cujo campo do alternador é alimentado por um retificador controlável. Esse sistema de excitação inclui um

alternador como excitatriz principal com retificadores não-controláveis. A excitatriz emprega auto-excitação e a potência do regulador de tensão é obtida da tensão de saída da excitatriz. Portanto, esse sistema tem uma não-linearidade adicional, simulada pelo uso de um multiplicador cujas entradas são o sinal de comando do regulador de tensão, V_A , e a tensão de saída da excitatriz, E_{fd} , vezes K_R . Esse modelo é aplicável a sistemas tais como os sistemas de excitação ALTERREX da General Electric, que empregam reguladores de tensão estáticos [16].

Comparando-se com os sistemas tipo CA1 e CA2, verifica-se que a realimentação transitória do sistema de excitação tem também uma característica não linear. Onde o ganho assume o valor K_F para tensão de saída da excitatriz menor que E_{fdn} e quando a tensão da excitatriz excede seu valor nominal, o ganho assume o valor K_N .

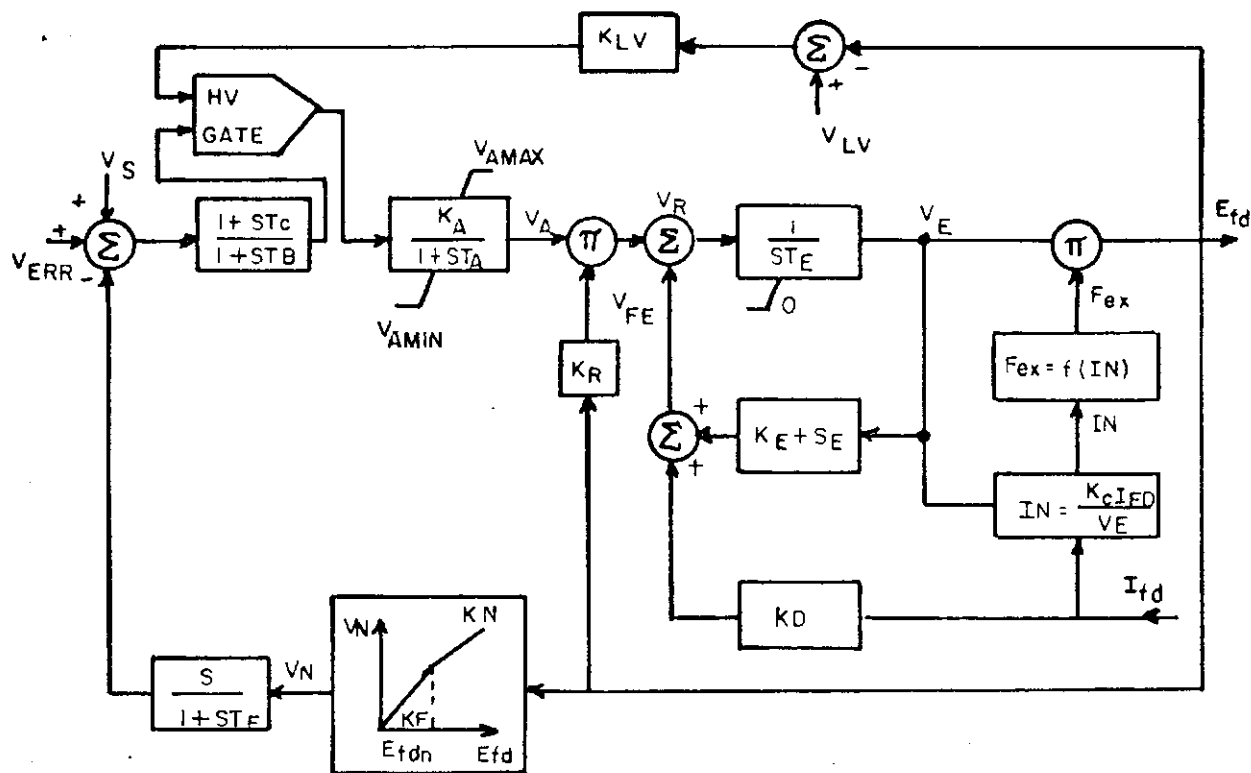


Fig. III.15 - Tipo CA3 - Excitatriz alternador retificador

a) Tipo CA4

A Fig. III.16 apresenta o diagrama de blocos do sistema de excitação tipo CA4, que é caracterizado como Sistema de Excitação com Alternador Alimentado através de Retificador Controlável.

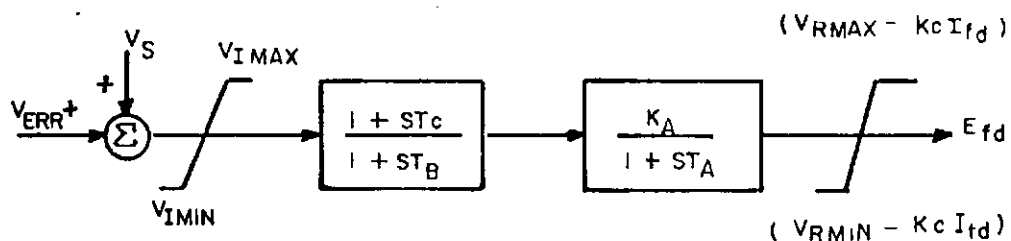


Fig. III.16 - Tipo CA4 - Excitatriz alternador retificador controlado

Esse sistema difere dos outros tipos de sistemas CA, principalmente, pela sua alta resposta inicial e pelo uso de uma ponte totalmente controlada a tiristores no circuito de saída da excitatriz. Os pulsos de gatilhamento dos tiristores da ponte são controlados pelo regulador de tensão. O alternador que serve de excitatriz usa um regulador de tensão independente para manter sua tensão de saída num valor constante. As constantes de tempo T_B e T_C , mostradas no diagrama de blocos da figura III.16, representam a função do compensador a vanço-atraso que assumem no modelo representado o papel equivalente aos parâmetros K_F e T_F no ramo de estabilização da excitatriz noutros modelos. O ganho e a constante de tempo associados ao regulador e/ou ao gatilhamento dos tiristores são simulados, no sistema de excitação tipo CA4, por K_A e T_A respectivamente.

Entre os sistemas de excitação que utilizam o modelo CA4 para simulação podem ser destacados o sistema de excitação ALTHYREX [23] e os sistemas de excitação com tiristores rotativo.

III.3.3 TIPO ST - SISTEMAS DE EXCITAÇÃO ESTÁTICOS

Esses sistemas de excitação utilizam a própria tensão terminal do gerador que após ser convertida a um nível adequado, através de transformadores, é retificada através de retificadores, controlados ou não, passando a suprir com corrente contínua o campo desse gerador.

a) Tipo ST1

A Fig. III.17, apresenta em diagramas de blocos um modelo para os sistemas de excitação tipo ST1, que visa representar todos os sistemas nos quais a potência de excitação é suprida através de um transformador ligado aos terminais do gerador (ou às unidades dos barramentos auxiliares) e é regulada por um retificador controlável.

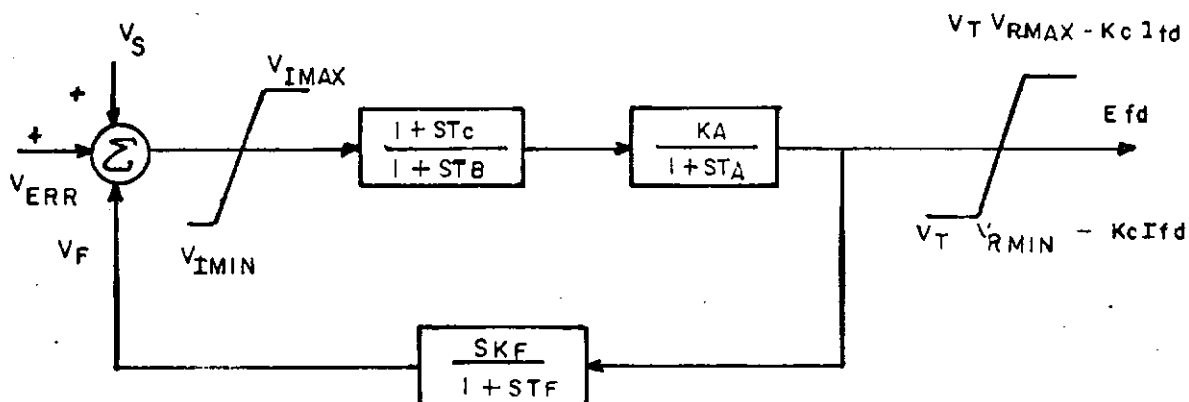


Fig. III.17 - Tipo ST1 - Excitatriz estática com retificador controlado como fonte de potência

Nesse tipo de sistema, as constantes de tempo inerentes à excitatriz são muito pequenas e a estabilização da excitatriz em tais casos não é necessário. O modelo mostrado é suficientemente versátil para representar a "Redução do Ganho Transitório" implementado tanto através das constantes T_B e T_C (neste caso K_F seria normalmente assumido como zero), ou através da escolha adequada da relação entre os parâmetros de realimentação K_F e T_F . O ganho do regulador de tensão e

qualquer constante de tempo inerente ao sistema de excitação são representados por K_A e T_A .

A menos do ramo de realimentação e da dependência de E_{fd} com a tensão terminal do gerador, o modelo do sistema ST1 é idêntico ao modelo do sistema de excitação tipo CA4, apresentado no ítem anterior.

Um exemplo de um sistema de excitação que se enquadra no modelo ST1 é o sistema de excitação estático da Westinghouse tipo WTA ou WHS.

b) Tipo ST2

A Fig. III.18 apresenta o diagrama de blocos do Sistema de Excitação tipo ST2, que equivale na classificação anterior do IEEE ao sistema de excitação tipo 3.

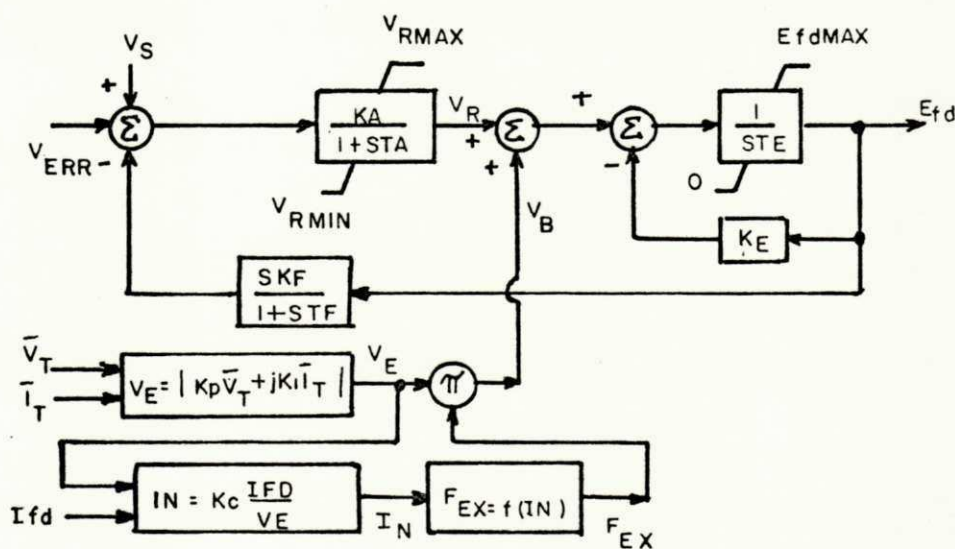


Fig. III.18 - Tipo ST2 - Alimentação "Compound" da excitatriz através de retificadores

Alguns sistemas estáticos utilizam ambas, a corrente e tensão (saídas do gerador) como fonte de potência da excitatriz, através de combinação fasorial entre tensão terminal V_T e corrente terminal I_T . E_{FDMAX} representa o limite da tensão da excitatriz devido à saturação dos componentes magnéticos. O regulador controla a saída da excitatriz através da saturação controlada dos transformadores de potência. T_E representa a relação de integração associada com a indutância dos enrolamentos de controle.

Um exemplo desse sistema de excitação estático é o SCT-PPT ou SCPT da General Electric.

c) Tipo ST3

Alguns sistemas de excitação estáticos utilizam quantidades internas do gerador (as quais podem ser expressas como combinações fasoriais da tensão e de corrente terminal do gerador) para servirem de fonte de potência à excitação. Tais sistemas de excitação são designados como tipo ST3 e são representados pelo diagrama de blocos mostrado na Fig.III.19.

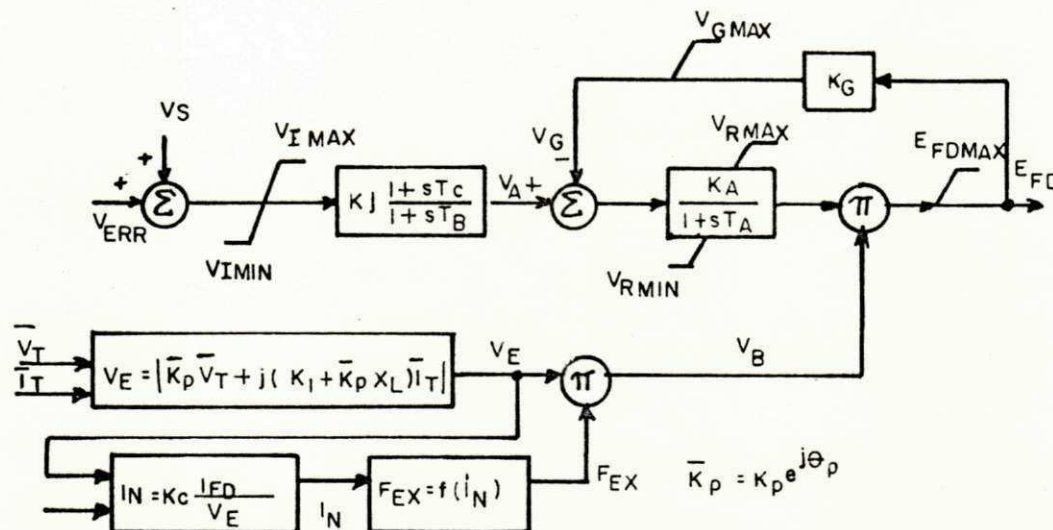


Fig. III.19 - Tipo ST3 - Excitatriz com fonte de alimentação "Compound" através de retificadores controlados

A representação desse tipo de sistema de excitação difere do tipo ST2 sob alguns aspectos: a inclusão do ganho K_J no elemento avanço-atraso série, o ganho K_C no ramo interno de realimentação do regulador de tensão, além do limite E_{fdMAX} estabelecido pelo nível de saturação dos componentes de potência.

Um exemplo desse tipo de sistema é o sistema de excitação GENERREX (General Electric) [47].

III.4 CONCLUSÃO

Os modelos apresentados neste Capítulo representam,

inclusive, novos equipamentos de excitação. A inclusão das funções de transferência de alguns sistema de excitação em comparação com os modelos propostos pelo IEEE, sugere uma sistemática de enfoque que permite o enquadramento, ou não, desses sistemas dentro de modelos classicamente utilizado no estudo de estabilidade de sistemas de potência. A inclusão das funções de transferências de estabilizadores de sistemas de potência, limitadores e outros sinais desejados permite a simulação dinâmica do sistema completo.

A título de exemplo, no Capítulo IV é apresentado um estudo de estabilidade no qual um sinal estabilizador é projetado para melhorar o desempenho de um sistema de potência, representado por três máquinas síncronas, equipadas com sistema de excitação estático e interligados a um barramento infinito.

CAPÍTULO IV

EFEITO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO DINÂMICO DO GERADOR SÍNCRONO - ESTUDO DA ESTABILIDADE

IV.1 INTRODUÇÃO

Num sistema de potência, as máquinas devem manter-se em sincronismo durante condições de operação, tanto normal quanto anormal. A propriedade do sistema de potência que assegura essa operação de equilíbrio sob tais condições é conhecida como estabilidade de sistema de potência. Dependendo do grau do distúrbio ocorrido durante a operação do sistema, a estabilidade pode ser classificada como: transitória ou dinâmica. O estudo da estabilidade transitória diz respeito à capacidade do sistema de potência permanecer em sincronismo durante grandes perturbações que resultem tanto de falhas de geração e transmissão quanto de mudanças súbitas de cargas ligadas ao sistema, assim como de falhas momentâneas. Já o estudo da estabilidade dinâmica trata do comportamento do sistema de potência quando o mesmo é submetido à pequenas perturbações. Por exemplo: pequenas mudanças no carregamento dos sistemas, pequenas variações na tensão de referência das máquinas, etc.

Os efeitos dos controles da excitação sobre a estabilidade e o uso de sinais estabilizadores suplementares atuando sobre os sistemas de excitação têm sido investigados em vários trabalhos teóricos e práticos [01, 02, 06, 10].

Neste capítulo, aspectos referentes à estabilidade do gerador síncrono conectado ao sistema de potência serão apresentados, assim como o efeito do sistema de excitação no seu comportamento dinâmico. Como exemplo, um sistema de potência de três máquinas que é parte de um grande sistema representado por uma barra infinita é estudado através de programa em computador digital, destacando-se o projeto de um sinal estabilizador e sua influência nos limites de estabilidade do gerador síncrono equipado com um sistema estático de excitação. O projeto ESP é baseado no modelo do gerador conectado a uma barra infinita através de uma impedância equivalente.

IV.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Grandes sistemas de geração e transmissão interligados, têm sido construídos e projetados para atender a crescente demanda de energia elétrica.

Idealmente, as cargas deveriam ser alimentadas, em qualquer momento, com tensões e frequência constantes, ou em termos práticos, dentro de certa faixa de tolerância que

viesses satisfazer às exigências dos consumidores. Para que isto se verifique, a estabilidade dos sistemas de potência se torna indispensável.

Como um sistema de potência é composto de máquinas síncronas interligadas, a estabilidade desse sistema está ligada ao comportamento dinâmico dessas máquinas, após a ocorrência de alguma perturbação. Se a perturbação não afetar a configuração do sistema, as máquinas deverão voltar ao mesmo estado inicial em um tempo finito após a extinção da perturbação. Pode-se dizer que, para uma dada condição de operação o sistema é estável se, após uma perturbação, a mudança nas variáveis (tensão terminal, ângulo de torque, frequência, etc.) permanece finita [10].

IV.3 O ESTUDO DA ESTABILIDADE

O primeiro passo no estudo da estabilidade é estabelecer um modelo matemático do sistema de potência durante o transitório. Os elementos incluídos nesse modelo são aqueles que afetam a aceleração (ou desaceleração) dos rotores das máquinas. A complexidade do modelo depende do tipo de transitório e do sistema a ser investigado. Geralmente, os componentes do sistema de potência que influenciam os torques elétricos e mecânicos das máquinas são os seguintes [01] :

1. O sistema interligado antes, durante e depois do

transitório.

2. As cargas e suas características.
3. Os parâmetros das máquinas síncronas.
4. Os sistemas de excitação das máquinas síncronas.
5. A turbina mecânica e o regulador de velocidade.
6. Outros componentes importantes da geração que influenciem no torque mecânico.
7. Outros controles suplementares.

O estudo do comportamento dinâmico do sistema depende da natureza das equações diferenciais que descrevem os vários componentes.

IV.4 COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA

Se as equações do sistema são lineares (ou podem ser linearizadas), técnicas de análise de sistemas lineares podem ser utilizadas para o estudo do comportamento dinâmico do sistema, cujo desempenho pode então ser analisado através de alguns métodos, tais como:

1. Baseado na teoria de controle clássico.
 - 1.1 Root-locus
 - 1.2 Análise no domínio da frequência (critério de Nyquist).
 - 1.3 Critério de Routh.
 - 1.4. Diagrama de Bode.

2. Baseado na teoria de controle moderno.
 - 2.1 Posicionamento de autovalores
 - 2.2 Realimentação de estados através de controle ótimo.

3. Simulação do modelo dinâmico do sistema (método indireto) que pode ser feito através de simulação analógica ou digital.

IV.4.1 Simulação dinâmica do modelo do sistema de potência - modelo da máquina

O comportamento dinâmico das máquinas síncronas no sistema de potência é descrito pelas suas características mecânicas e elétricas incluindo os respectivos sistemas de controle da excitação.

O modelo de máquina utilizado no presente trabalho é o modelo de terceira ordem [22]. Esse modelo é o mais simplificado que leva em conta a ação do regulador de tensão [29]. As equações que descrevem o comportamento dinâmico da máquina síncrona são mostradas a seguir, onde todas as quantidades são medidas no eixo de referência individual da máquina.

Equações Elétricas:

$$\dot{e}'_q = \frac{1}{T_{do}} (e_{fd} - E_I) \quad (\text{IV.1})$$

onde, $E_I = e'_q + (X_d - X'_d) i_d$

Equações Mecânicas:

$$\ddot{\delta} = \frac{W_0}{2H} (P_m - P_e) - \frac{W_0}{2H} K_d \dot{\delta}$$

onde, $P_e = V_d i_d + V_q i_q + r |i_t|^2$

Esse modelo representa o gerador, conectado à rede, por uma fonte de tensão e' atrás da reatância transitória X'_d .

Nesse modelo o módulo e o ângulo de e' são função de duas condições da máquina, condições interna e externas, respectivamente. Portanto, é necessário um processo iterativo para se encontrar um valor consistente de e' , o qual satisfaça as equações da rede e da máquina simultaneamente [28].

Os efeitos da saturação magnética são representados pelo valor modificado de E_I na equação (IV.1) onde:

$$E'_I = E_I + \Delta E_I \tag{IV.3}$$

onde, $\Delta E_I = A_s e^{B_s (A_g - 0.8)}$

e $A_g = |V_t + I_t (r + X_p)|$

IV.4.2 Modelos para Simulação Dinâmica de Reguladores de Tensão e Sistemas de Excitação

O principal controle de um gerador é através de tensão de excitação E_{fd} . Existem vários tipos de excitatrizes usados em simulação. De uma forma geral, entretanto, dois tipos podem ser distinguidos, conforme foi visto no Capítulo II:

1. Excitatriz rotativa, que pode usar uma máquina de corrente contínua ou alternada, com retificador, para excitar o campo do gerador principal (tipo CC, tipo CA).
2. Excitatriz estática, que usa tensão DC obtida através de retificadores, controláveis ou não, para suprir a corrente contínua necessária ao campo do gerador (tipo TR).

Para o primeiro tipo, pode-se simular seu comportamento dinâmico conforme o diagrama de blocos da fig. IV.1.

Para a simulação dinâmica deste modelo, tem-se as seguintes equações de estado [29] :

$$\dot{V}'_t = \frac{1}{T_{sen}} (V_t - V'_t)$$

$$\dot{F} = \mu_s E_{fd} - \frac{F'}{T_{se}} \quad \text{e} \quad F = F'$$

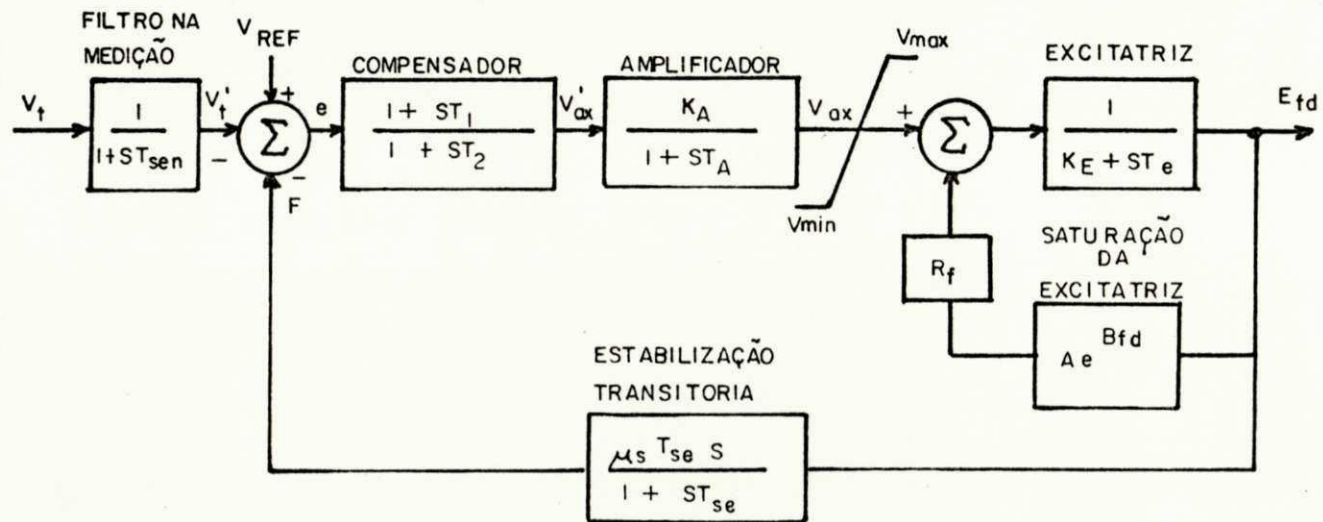


Fig. IV.1 - Diagrama de blocos de um sistema de excitação com excitatriz rotativa

$$V_{ax}' = V_{ax}'' + T_1 \dot{V}_{ax}'''$$

$$\dot{V}_{ax}''' = \frac{1}{T_2} (e - V_{ax}'') \text{ e } e = V_{ref} - V_t' - F$$

$$\dot{V}_{ax}' = \frac{1}{T_A} (K_A V_{ax}' - V_{ax})$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_e} (X_2 - K_e E_{fd} - R_f A_e^B E_{fd})$$

$$X_2 = \min (\max (V_{max}, V_{min}), V_{max})$$

As condições iniciais dos estados são derivadas do regime permanente com V_t e E_{fd} calculadas das condições iniciais do gerador.

$$V_{to} \text{ e } E_{fd}$$

$$V_{to}' = V_{to}, \quad F_o' = \mu_s T_{se} E_{fdo}$$

$$V_{axo} = K_e E_{fdo} + R_f A_e^B E_{fdo}$$

$$V_{axo}'' = V_{axo}' = V_{axo}/K_A$$

e

$$V_{ref} = V_{to} + V_{axo}/K_A$$

Para o segundo tipo, fig. IV.2, tem-se as seguintes

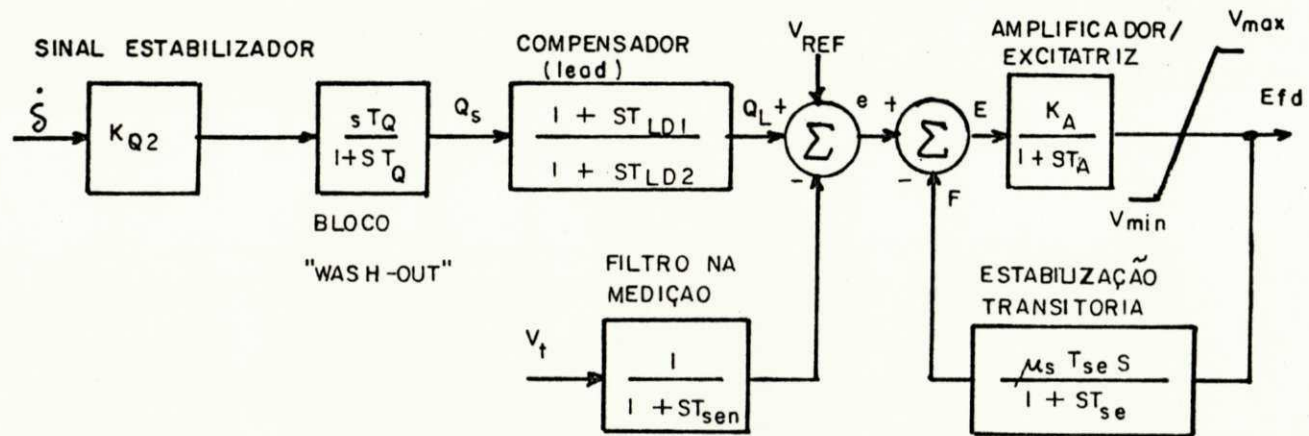
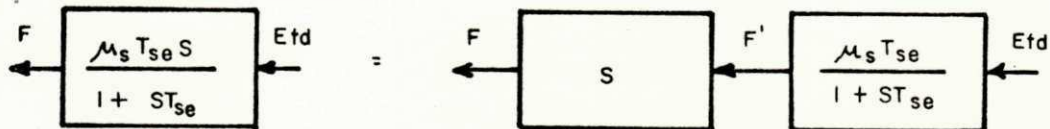


Fig. IV.2 - Diagrama de blocos de um sistema de excitação com excitatriz estática

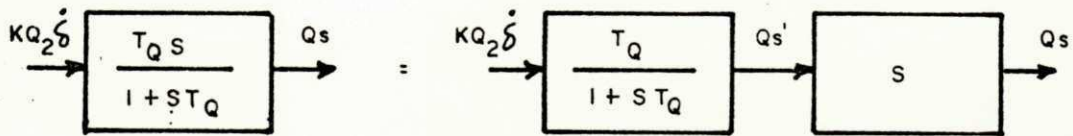
equações de estado:

$$\dot{V}_t = \frac{1}{T_{sen}} (V_t - V_t')$$



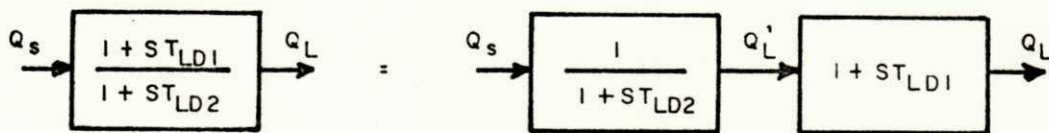
$$\dot{F}' = \mu_s E_{fd} - \frac{1}{T_{se}} F'$$

$$F = F'$$



$$\dot{Q}_s' = K Q_2 \delta - \frac{1}{T_Q} Q_s'$$

$$Q_s = Q_s'$$



$$Q_L = \frac{1}{T_{LD2}} (Q_s - Q_L) , Q_L = Q_i + T_{LD1} \dot{Q}_i'$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_A} (K_A \varepsilon - E_{cd}) , \varepsilon = e - F$$

$$e = V_{ref} - \dot{V}_t + Q_L$$

Condições iniciais com V_{to} e E_{fdo} vindas do gerador.

$$V_{to} = V_{to}$$

$$F_o = \mu_s T_{se} E_{fdo}$$

$$Q_s = 0$$

$$Q_i = 0$$

$$V_{ref} = V_{to} + E_{fd}/K_A$$

IV.4.3 Condições iniciais para a simulação

A simulação sempre começa com o sistema de potência num ponto de operação em regime permanente. Os valores iniciais podem ser determinados para o sistema da seguinte forma:

O diagrama vetorial de regime permanente [02] é mostrado na fig.IV.3.

Inicialmente, a corrente terminal no sistema de eixos de referência pode ser determinada a partir dos dados de um fluxo de cargas [28] .

$$I_t = (P_g - jQ_g)/\text{CONJ}(V_t) \quad (\text{IV.4})$$

Onde P_g e Q_g são respectivamente as potências ativa e reativa dos terminais do gerador. A tensão atrás da reatância transitória do gerador é:

$$e' = V_t + I_t (r + jX'_d) \quad (\text{IV.5})$$

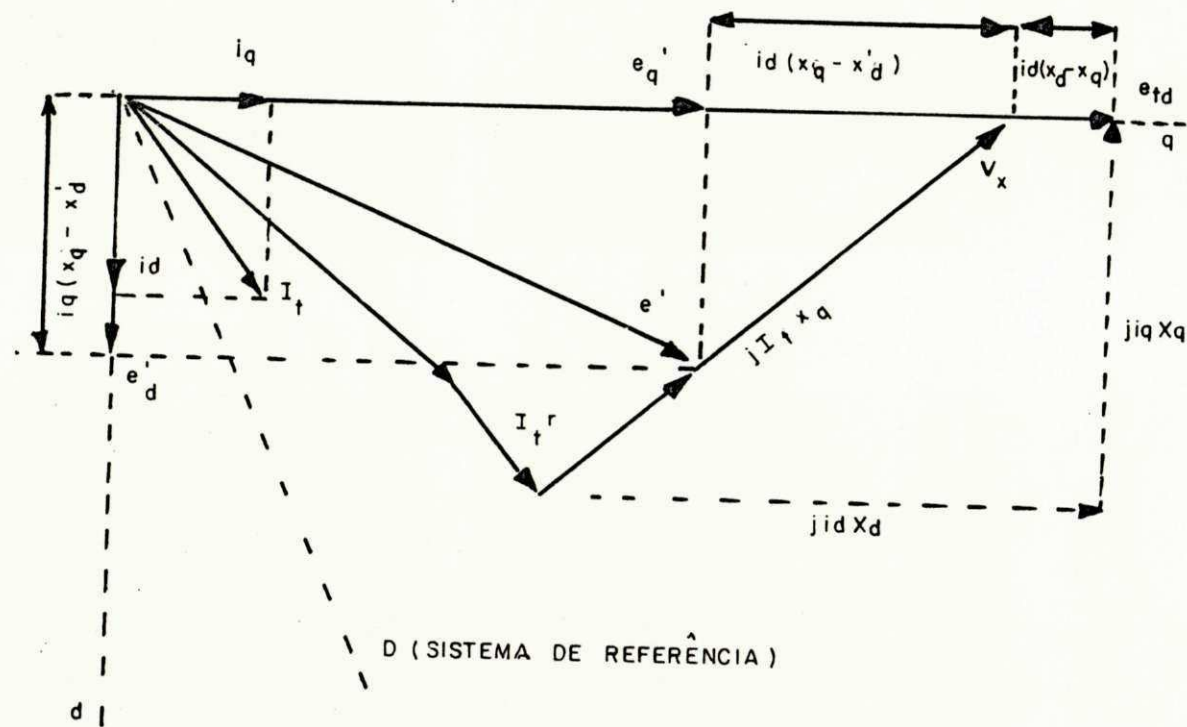


Fig. IV.3 - Diagrama vetorial em regime permanente [02]

A potência mecânica é:

$$P_m = P_g + I_t^2 r \quad (\text{IV.6})$$

e o ângulo de potência inicial é:

$$\delta = t_g^{-1} \left[I_m(V_x) / R_e(V_x) \right] \quad (\text{IV.7})$$

onde a tensão V_x , é aquela que determina a posição do eixo q, definida no diagrama vetorial como:

$$V_x = V_t + I_t (r + jX_q) \quad (\text{IV.8})$$

Os valores iniciais dos estados do sistema de excitação podem ser derivados da condição de regime permanente, onde o valor inicial de V_e (saída da excitação) é assumido como o valor inicial de e_{fd} nas equações do gerador.

Com todos os aspectos dinâmicos e estáticos do sistema modelado, e os estados iniciais do sistema definido, a simulação digital pode ser feita para se obter a resposta transitória do sistemas.

IV.4.4 EFEITO DOS SINAIS ESTABILIZADORES

O uso de sistemas de excitação de alto ganho e resposta rápida em geral causam problemas de estabilidade dinâmica, devido a redução do amortecimento do gerador no sistema de

potência após a ocorrência de uma perturbação.

A fim de melhorar o amortecimento e ampliar os limites de estabilidade, um sinal adicional pode ser introduzido ao controle da excitação [24] .

Os reguladores de tensão podem melhorar os torques sincronizantes, no entanto seus efeitos sobre os torques de amortecimento são pequenos. E em casos onde o sistema apresenta característica de amortecimento negativo, os reguladores de tensão geralmente agravam a situação através do aumento desse amortecimento. Sinais suplementares para introduzir torques de amortecimentos artificiais e reduzir as oscilações entre geradores e sistemas têm sido utilizados com grande sucesso [01] .

De uma forma geral pode-se afirmar que o sistema de excitação de alto ganho introduz um considerável atraso de fase em baixas frequências do sistema, exatamente acima da frequência natural do sistema de excitação.

O estudo de sinais estabilizadores pode ser feito de duas maneiras: usando a teoria de controle clássico ou a teoria de controle moderno. Nessa última, sinais derivados de vários estados do sistema são realimentados através de ganhos constantes obtidos através de uma estratégia de controle ótimo [28] .

Neste Capítulo o estudo e a implementação do sinal estabilizador é feito usando a teoria de controle clássico.

IV.5 PROJETO DE UM SINAL ESTABILIZADOR CONVENCIONAL DERIVADO DA VELOCIDADE DA MÁQUINA BASEADO NO MODELO MÁQUINA/ BARRA INFINITA

Um compensador avanço-atraso em série com o sinal de velocidade torna-se necessário, para compensar o atraso característico introduzido pelo conjunto máquina/sistema de excitação na frequência dominante do sistema [24]. Um diagrama de blocos, mostrado na fig. IV.5, serve para representar um modelo aproximado de segunda ordem do referido conjunto. A partir do diagrama de blocos, utilizando-se a análise de pequenas perturbações e as equações fundamentais da máquina [06] sua função de transferência pode ser determinada:

$$G(s) = \frac{K_2 K_e / T_{do}' T_e}{s^2 + (T_e + K_3 T_{do}') / K_3 T_{do}' T_e s + K_6 K_e / T_{do}' T_e} \quad (IV.9)$$

onde,

$$K_2 = K_I \{ R_{eq} V_{xo} + I_{qo} [R_{eq}^2 + (X_q + X_{eq})^2] \}$$

$$K_3 = 1 / [1 + K_I (X_d - x_d') (X_q + X_{eq})]$$

$$K_6 = (V_{qo} / V_{to}) [1 - K_I x_d' (X_q + X_{eq})] - (V_{do} / V_{to}) K_I X_q R_{eq}$$

com, $K_I = 1 / [R_{eq}^2 + (X_q + X_{eq}) (x_d' + X_{eq})]$

onde o subscrito (o) significa ponto de operação inicial. De forma mais compacta, a função de transferência pode ser escrita como:

$$G(s) = \frac{K_2 K_e / T_{do}' T_e}{s^2 + 2\delta_x w_x s + w_x^2} \quad (\text{IV.10})$$

ou

$$G(s) = \frac{K_2 K_e / T_{do}' T_e}{d(s)} \quad (\text{IV.11})$$

onde, $\delta_x = (T_e + K_3 T_{do}') / (2w_x K_3 T_{do}' T_e)$

$$w_x = \sqrt{K_6 K_e / T_{do}' T_e}$$

Para qualquer frequência de oscilação, $d(j\omega)$ fornece a fase do conjunto máquina/sistema de excitação.

Estudos e ensaios têm mostrado que um sinal derivado da velocidade da máquina realimentado através de um compensador avanço-atraso, melhora o amortecimento da resposta angular da máquina [06, 26]. A fig. IV.4 mostra o diagrama de blocos do estabilizador. A função de transferência considerada para o sinal estabilizador aplicado ao sistema de excitação e que representa a relação entre as variações de velocidade de máquina e o sinal de saída ΔV_s , é dada por:

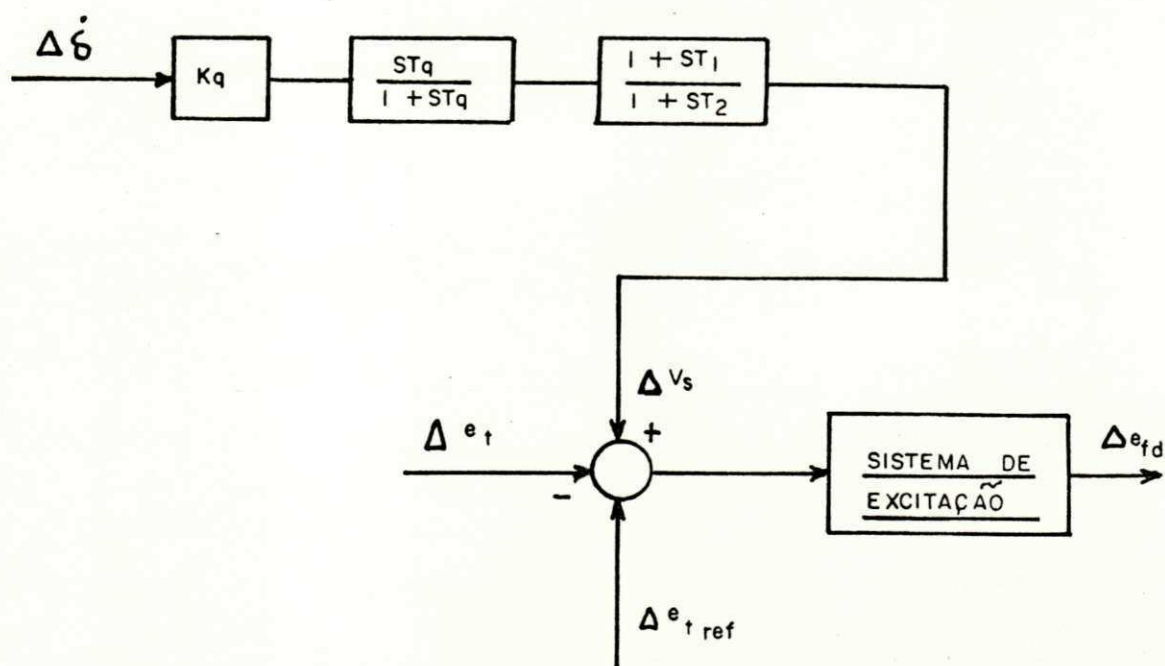


Fig. IV.4 - Diagrama de blocos do sinal estabilizador derivado da velocidade da máquina

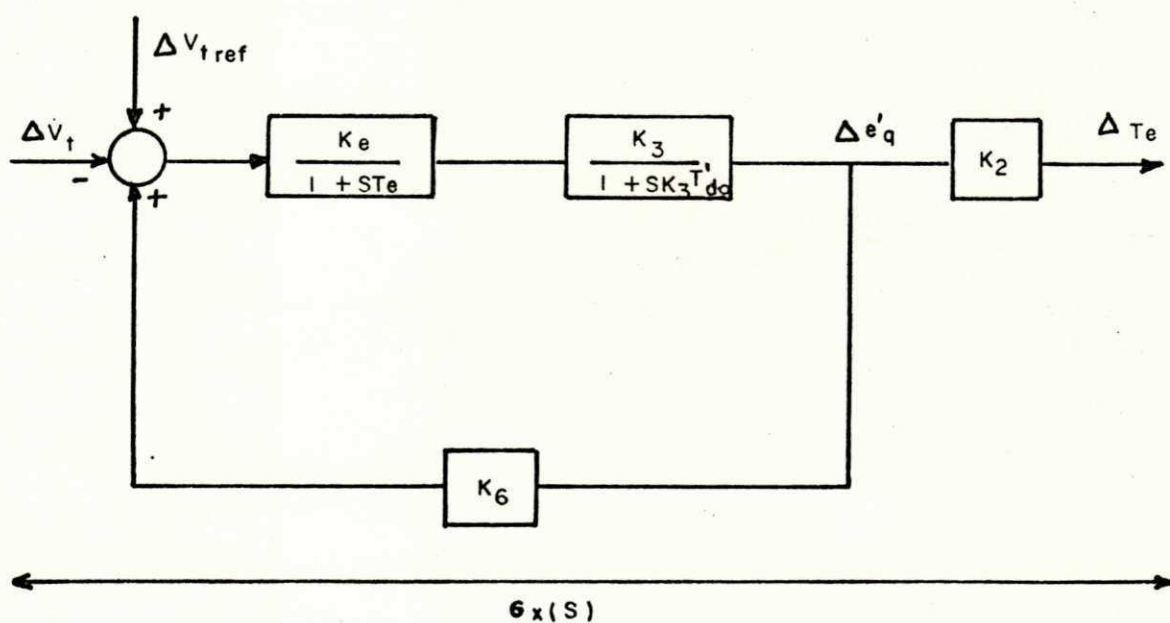


Fig. IV.5 - Representação aproximada da máquina/sistema de excitação

$$H(s) = \frac{K_q ST_q}{1+ST_q} \cdot \frac{1+ST_1}{1+ST_2} \quad (\text{IV.12})$$

onde K_q é o ganho do sinal estabilizador, que normalmente necessita de ajustamento no campo em aplicações reais [24]. O termo em avanço do compensador dinâmico é representado por $(1 + ST_1)/(1 + ST_2)$. O termo $ST_q/(1 + ST_q)$ assume a função de filtro passa faixa, no sentido de impedir que o regulador de tensão atue de forma indevida em virtude de erros prolongados na frequência. O valor de T_q fica na faixa de 1,0 a 60,0s ou 4,0 a 30,0s [28].

Em baixas frequências de oscilações, indicativo de fracos torques sincronizantes, a função máquina/regulador apresenta um pequeno ângulo de atraso de fase. Nesses casos, o compensador dinâmico deve compensar esse efeito fornecendo um pequeno avanço [06,27].

Em altas frequências de oscilação, o ângulo de fase da máquina torna-se cada vez mais atrasado; então não há perigo de aumento de compensação [29].

Assim como o ganho K_q , as constantes de tempo T_1 e T_2 devem ser ajustadas para oferecer um bom amortecimento no modo de operação dominante associado às incursões do ângulo de carga do gerador.

No projeto do compensador dinâmico, a frequência de oscilação dominante da máquina controlada deve ser conhecida. Para determinar essa frequência, dá-se uma pequena va

riação na carga do sistema e verifica-se as oscilações da potência terminal. A partir dessa informação, o valor dessa frequência pode ser estimado.

Para qualquer frequência de interesse (ω_m), $d(s)$ da equação (IV.11) fornece a fase do gerador/sistema de excitação (θ_m).

As constantes de tempo do compensador dinâmico são calculadas como se segue [01,33] .

$$T_2 = \frac{1}{\omega_m} \sqrt{a} \quad (IV.13)$$

onde, $a = (1 + \text{sen}\theta_m)/(1 - \text{sen}\theta_m)$ para uma compensação de θ_m graus.

$$T_1 = aT_2 \quad (IV.14)$$

IV.6 SISTEMA UTILIZADO NA SIMULAÇÃO

O sistema utilizado é um sistema de potência de três máquinas que é parte de um sistema maior representado por uma barra infinita.

A fig. IV.6, mostra o diagrama unifilar do sistema. Cada máquina tem excitatriz estática de resposta rápida com realimentação a partir da tensão terminal. O efeito do regulador de velocidade não é levado em consideração.

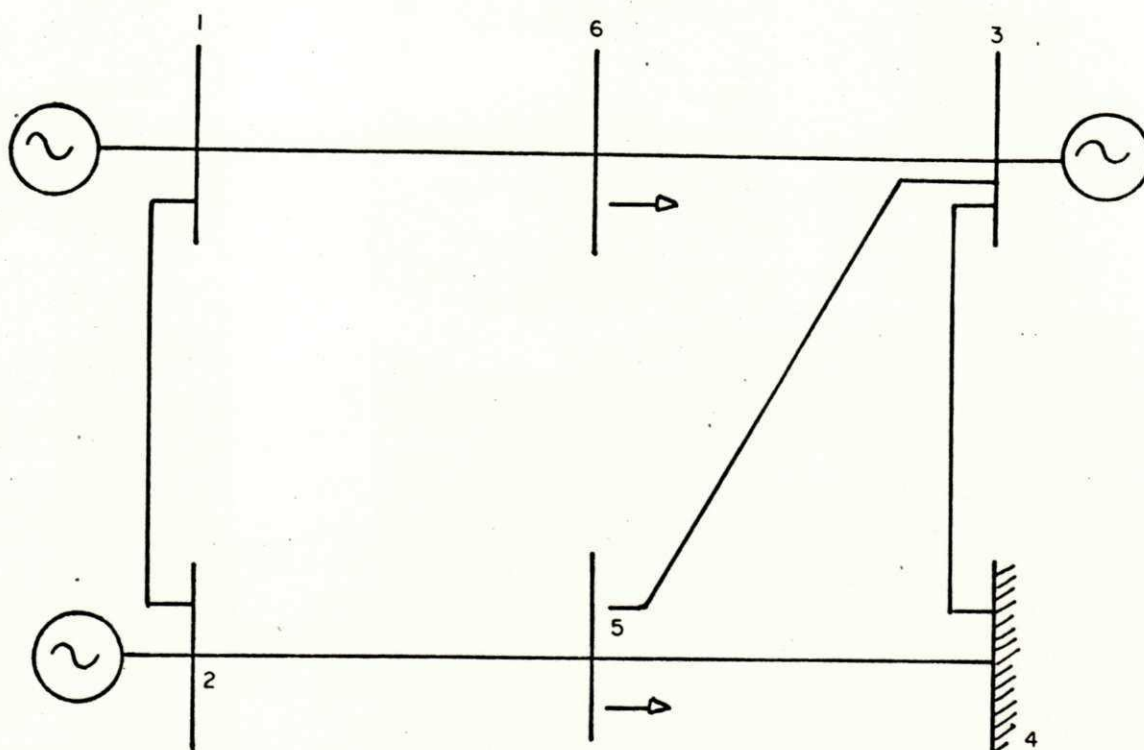


Fig. IV.6 - Diagrama unifilar do sistema utilizado para a simulação digital

Na simulação os seguintes dados do sistema foram utilizados:

- Dados das linhas de transmissão (PI equivalente, base de 100 MVA e tensão do sistema): Valores em p.u.

BARRA	BARRA	R	X	Y
1	6	0.0101	0.0615	0.8000
3	6	0.0057	0.0460	0.0980
3	5	0.0836	0.2360	0.1856
3	4	0.0628	0.1100	0.3654
4	5	0.0033	0.0313	1.1440
2	5	0.0255	0.1720	0.6500
1	2	0.0856	0.2360	0.1856

- Dados da carga (em p.u. de 100MVA).

BARRA	ATIVA	REATIVA
1	4.28	2.14
6	0.99	0.45

- Dados do gerador (em p.u. - bases 100MVA e tensão nominal da máquina).

MÁQUINA	X'_d	X_q	X_d	H	T'_{do}
1	0.093	0.900	0.950	8.2	6.2
2	0.179	1.680	1.750	4.3	5.2
3	0.114	0.800	0.825	6.3	4.8

- Dados do sistema de excitação (em p.u., base do rotor). Ver fig. IV.6

MÁQUINA	KA	TA	V_{\max}	V_{\min}
1	200	0.05	5.0	-5.0
2	50	0.04	5.0	-5.0
3	100	0.02	5.0	-5.0

Para inicialização da simulação dinâmica do sistema, faz-se necessário a solução prévia de um fluxo de carga com o objetivo de determinar as condições iniciais e algumas variáveis necessárias à linearização do sistema. Segue-se os resultados do fluxo de carga:

MÁQUINA Barra	TENSÃO		POTÊNCIA GERADA	
	Módulo	Ângulo	Ativa	Reativa
1	1.0100	12.6455	1.7000	-0.6413
2	1.0000	7.1693	0.7200	-0.1784
3	1.0100	7.1742	1.3500	-0.6913
4	1.0200	0.0000	1.4327	1.3815

Escolheu-se a máquina da barra 1 para a implementação do ESP. A partir dos resultados obtidos no fluxo de carga, a impedância equivalente com relação à barra infinita é determinada (ver APÊNDICE D).

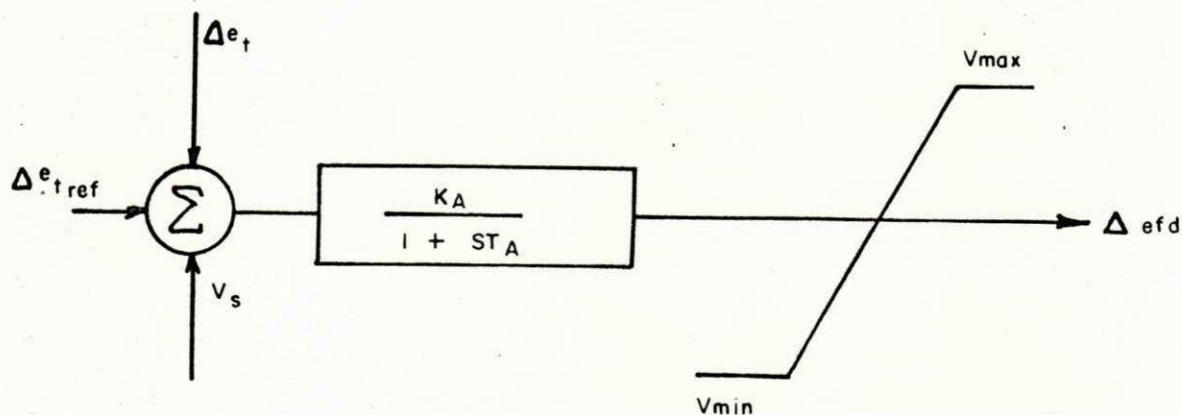


Fig. IV.7 - Diagrama de bloco simplificado do sistema de excitação estático

A equação que calcula o valor da impedância equivalente, pode ser deduzida a partir de um sistema genérico de duas barras ligadas através de uma impedância Z_{eq} [31].

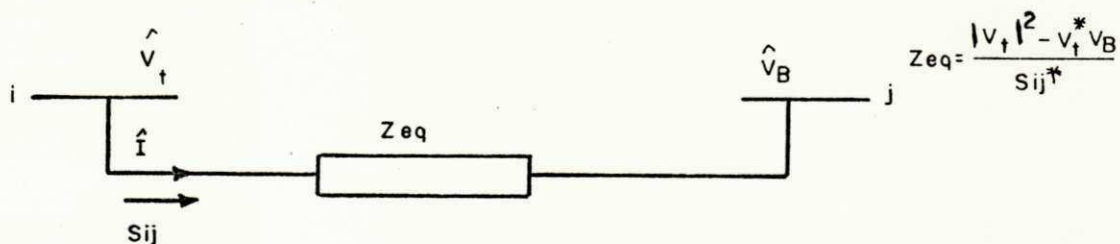


Fig. IV.8 - Sistema genérico de duas barras ligadas através de uma impedância Z_{eq}

No projeto do compensador dinâmico, a frequência do minante de oscilação do gerador controlado deve ser determinada. Para determinar essa frequência, a carga da barra 6 (fig. IV.6) foi ligeiramente variada e a partir da oscilação de potência o valor dessa frequência foi determinado: $\omega = 7.38$ rad/s para a máquina 1.

O projeto completo do sinal estabilizador com os va

lores de K_q , T_e e T_2 ajustados pelo método de tentativa de erro ($\theta = 60^\circ$), é apresentado a seguir:

MÁQUINA	T_q	K_q	T_1	T_2
1	1.5	0.1	0.5043	0.0362

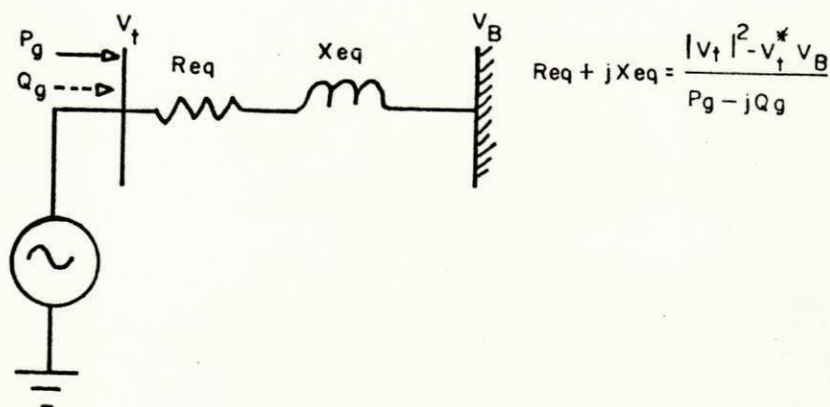


Fig. IV.9 - Máquina ligada a uma barra infinita através de uma impedância equivalente

IV.7 IMPLEMENTAÇÃO DO SINAL ESTABILIZADOR

A simulação do sistema representado na Fig. IV.6 foi feita usando-se um programa de estabilidade disponível no DEE 30 .

Para observar a resposta angular do gerador 1, simulou-se um curto-circuito trifásico equilibrado nos seus terminais, durante 0.1 s, nos seguintes casos:

- Sem nenhum estabilizador implementado, Fig. IV.10 e Fig. IV.12
- Com sinal estabilizador convencional implementado, Fig. IV.11 e Fig. IV.13.

IV.8 CONCLUSÕES

Das simulações feitas com e sem sinal estabilizador , observa-se o seguinte:

- Quando nenhum sinal adicional é aplicado ao sistema de excitação da máquina, as oscilações do ângulo de torque da máquina são fracamente amortecidas, evidenciando a característica do sistema de excitação estático de rápida resposta utilizado na máquina, Fig. IV.7.

Observa-se ainda que:

- A aplicação do sinal estabilizador no sistema de excitação estático de alto ganho da máquina 1, reduz sensivelmente as oscilações do ângulo de torque da referida máquina, Fig. IV.10 e Fig. IV.11.

- O sinal estabilizador pode ser projetado e implementado para cada uma das três máquinas do sistema da Fig. IV.6, sob dois aspectos:

- a) Sem considerar o acoplamento mútuo entre as máquinas.
- b) Considerando o acoplamento mútuo entre as máquinas, usando controle clássico 24 ou controle ótimo 28 .

- O sinal estabilizador requer um ganho constante em série (K_q) o qual necessita ajustamento por tentativa. Seu valor está na faixa de 0,1 a 100,0. No presente trabalho o

valor de K_q utilizado foi 0,1.

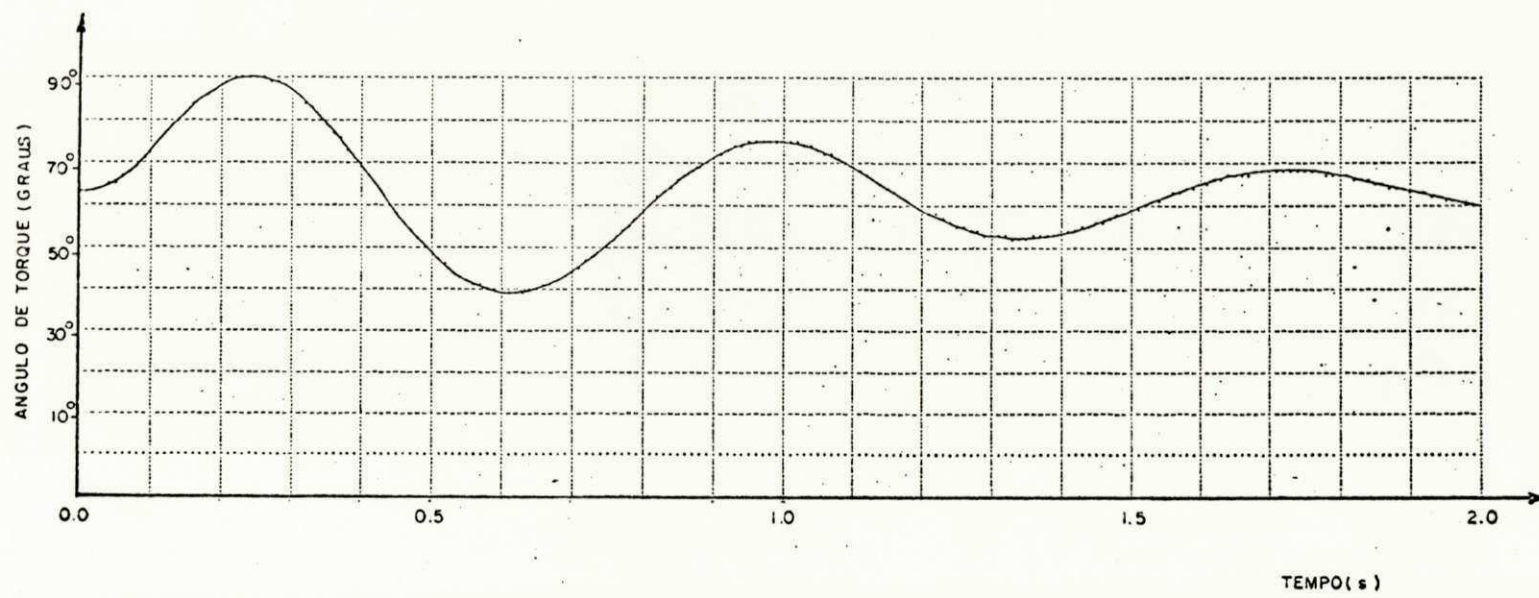


Fig. IV.10 - Curto-circuito trifásico equilibrado na barra 1 durante 0,1 s, sem nenhum sinal estabilizador implementado (ângulo de torque)

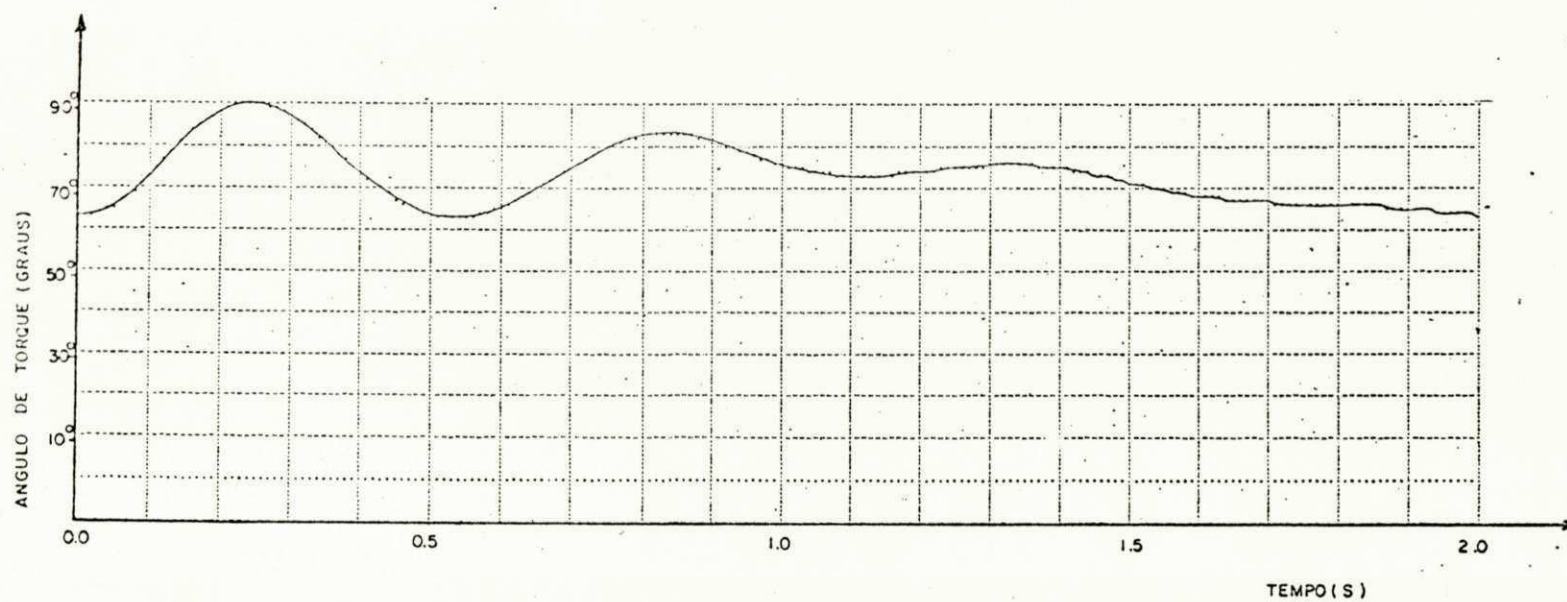


Fig. IV.11 - Curto-circuito trifásico equilibrado na barra 1 durante 0,1 s, com sinal estabilizador implantado na máquina 1 (ângulo de torque)

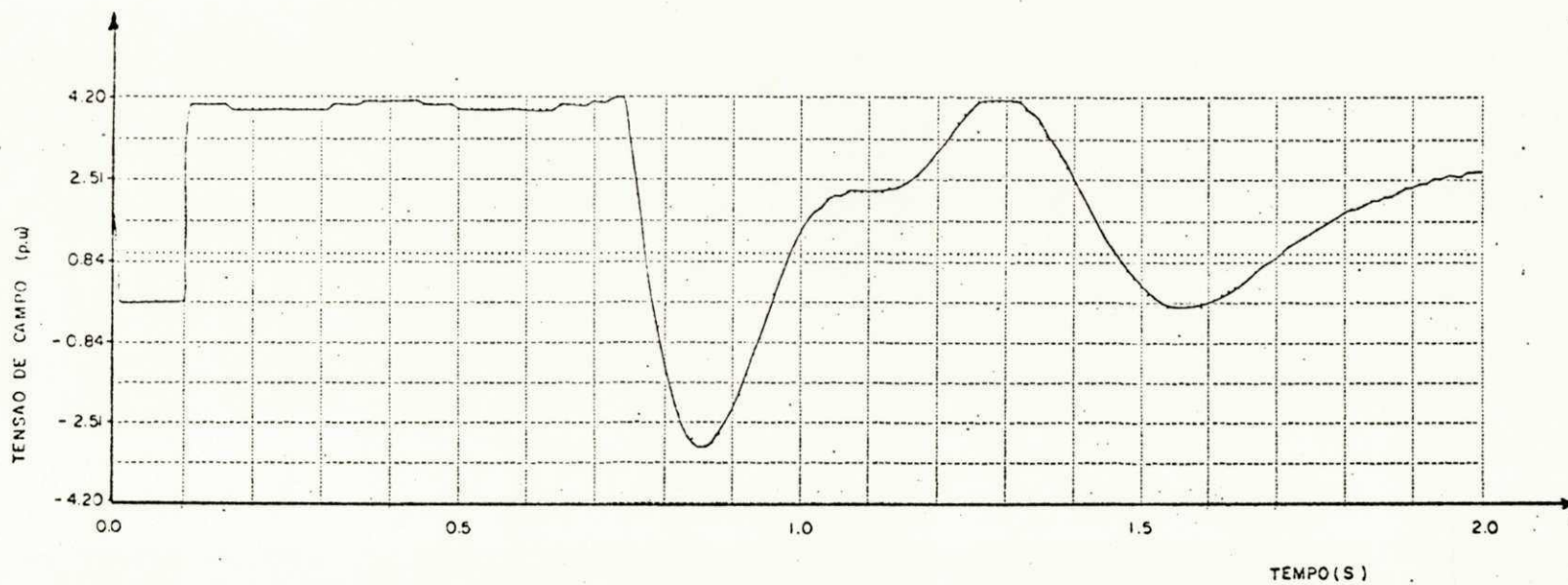


Fig. IV.12 - Curto-circuito trifásico equilibrado na barra 1 durante 0,1 s, sem nenhum sinal estabilizador implementado (tensão de campo)

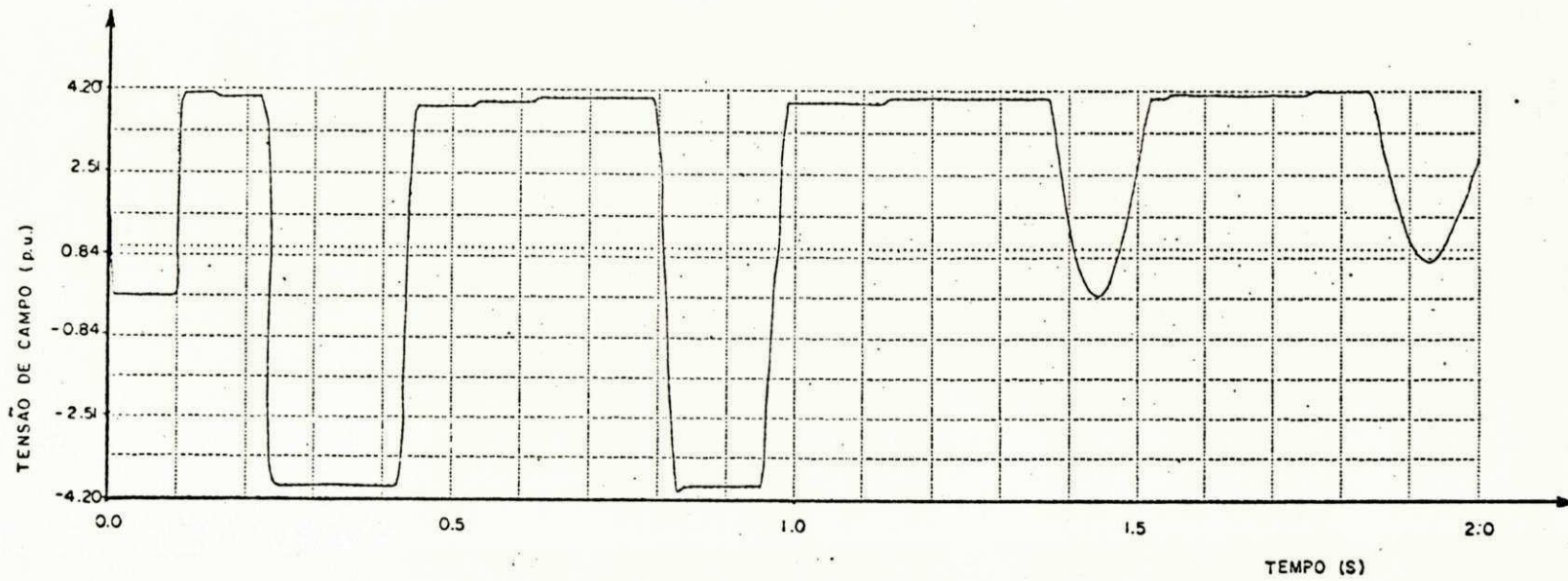


Fig. IV.13 - Curto-circuito trifásico equilibrado na barra 1 durante 0,1 s, com sinal estabilizador implantado na máquina 1 (tensão de campo)

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A grande influência dos sistemas de excitação das máquinas síncronas sobre a estabilidade dos sistemas de potência fez com que, ao longo dos anos, estes sistemas fossem perfeiçoados até atingir, nos dias atuais, um alto grau de desempenho e confiabilidade.

Como a maioria dos problemas que envolvem o comportamento dos sistemas de excitação requer o uso de computadores digitais, tornou-se necessário o estabelecimento de modelos adequados à representação destes sistemas.

A principal contribuição deste trabalho, foi apresentar uma visão geral dos sistemas de excitação de geradores síncronos, coletar e detalhar de forma sistematizada o que se encontrava disperso na literatura, no que se refere às partes constituintes destes sistemas (excitatriz, amplificadores de potência, compensadores, limitadores, etc.) e sugerir uma sistemática de enfoque que permite o estabelecimento de modelos para estes sistemas, a partir do papel de cada uma destas partes dentro do sistema, através da obtenção de suas funções de transferência, para finalmente chegar-se ao modelo desejado.

Modelos representativos para os diferentes sistemas de excitação existentes, foram apresentados pelo IEEE em 1968 [08]. Como alguns sistemas de excitação (de diferentes fabricantes) não se enquadravam adequadamente a esses modelos, eles foram atualizados posteriormente em 1981 [07]. Este trabalho tece considerações e comparações entre os dois enfoques e apresentou casos de sistemas não enquadráveis nos antigos modelos do IEEE.

Neste trabalho foi analisado, também, o efeito de um sinal estabilizador, derivado da velocidade de máquina, sobre o desempenho de um sistema estático de excitação representado através de um modelo simplificado. A técnica utilizada foi de controle clássico, mas poderia também ter sido aplicado o princípio de controle ótimo, onde vários sinais, derivados de vários estados do sistema, seriam utilizados na realimentação com diferentes ganhos, para otimizar o desempenho do sistema de potência.

Sugere-se para a continuidade dos estudos sobre o assunto focalizado neste trabalho, a utilização de controle adaptativo no regulador de tensão, com ou sem sinal estabilizador, para otimizar o amortecimento das oscilações eletromecânicas, sob diversas condições de operações do sistema de potência.

A P É N D I C E

APÊNDICE A

RAZÃO DE RESPOSTA DA TENSÃO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

O IEEE [9] define a razão de resposta da tensão do sistema de excitação como sendo o valor numérico que é obtido quando a resposta de tensão do sistema em volts por segundo, medida sobre o primeiro meio segundo de intervalo, a menos de outra especificação, é dividida pela tensão de campo da máquina síncrona à carga nominal.

A curva da resposta tensão do sistema de excitação versus tempo é mostrada na Fig. A.1.

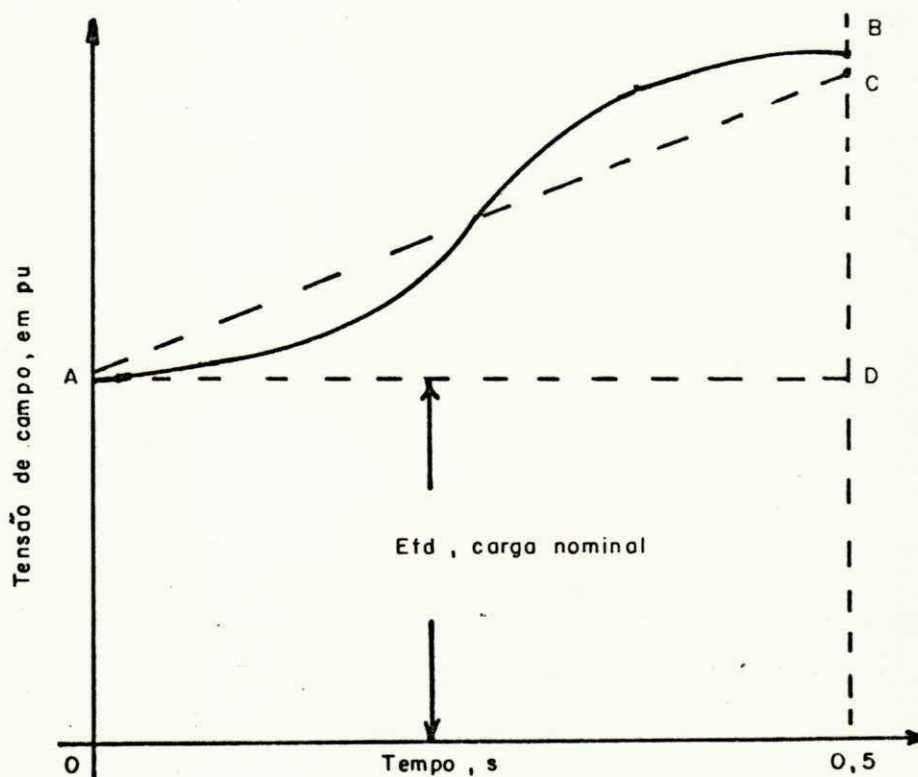


Fig. A.1 - Definição da razão de resposta da tensão

A resposta em tensão do sistema de excitação é dada, portanto, pelo acréscimo ou decréscimo da tensão de saída do sistema de excitação, isto é, a inclinação determinada por:

$$RR = \frac{CD}{(0A) (0,5)} \quad (A.1)$$

O tempo em segundos para a tensão de excitação atingir 95% da tensão de teto é conhecido como o tempo de resposta de tensão do sistema de excitação.

O tempo de 0,5 S foi escolhido para sistemas de excitação providos de antigos e lentos reguladores de tensão. Um sistema de excitação que possua um tempo de resposta de tensão de 0,1 S ou menos é caracterizado como sendo um sistema de excitação de alta resposta inicial [03] .

APÊNDICE B

TABELA B.1 GRANDEZAS E PONTOS TÉCNICOS QUE DEVEM SER CONSIDERADOS NO PROJETO DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO E REGULAÇÃO [14]

<u>DADOS CARACTERÍSTICOS DO GERADOR</u>	<u>CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO NO LADO DA REDE NA INSTALAÇÃO</u>	<u>OBSERVAÇÕES ESPECIAIS DO LADO DOS ACIONAMENTOS</u>	<u>OUTRAS GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA</u>
<u>Dados de placa:</u>	<u>Tipo de Operação:</u>	<u>Tipo de Acionamento:</u>	<u>Segurança na Operação</u>
Potência, $\cos \theta$	Operação em ilha ou paralela	Turbina hidráulica	Garantia na energia de excitação
Tensão	Operação interligada	Turbina a vapor Motor Síncrono	Garantia na energia auxiliar
Frequência	Operação Gerador, Motor, Compensador Síncrono	Motor Assíncrono	Autarquia do bloco máquina supervisão
Velocidade	Operação Reversível		
<u>Dados de excitação</u>	Operação Inversor (Acoplamento na Rede)		
<u>Reatâncias Constantes de Tempo, etc:</u>	<u>Alimentação a partir de:</u>	<u>Usina Hidráulica:</u>	<u>Custos</u>
Reatâncias Síncronas X_d, X_q' Reatância Transitória $X'd, X'q$	Barramento infinito transmissão longas distâncias transmissão a vazio	Aumento de tensão através de uma descarga imediata. Variação de velocidade	Equipamentos Arranjo Dimensionamento
Constantes de Tempo a vazio e em curto-circuito	<u>Operação em Conjunto com:</u>	Golpe de ariete no sistema hidráulico	<u>Economia</u> Preço Rendimento
Característica estacionária Amortecimento Saturação Aquecimento Características a Vazio e curto-circuito Tempo de partida	Compensador síncrono Banco de Condensadores Compensadores Estáticos Transformador Regulador	Comunicadores vizinhos Garantia no desligamento Alimentação Auxiliar	<u>Pontos Técnicos Sobre a Regulação</u> Dinâmica de Regulação Suplementar Regulação Ótima

DADOS CARACTERÍSTICOS DO GERADOR	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO NO LADO DA REDE NA INSTALAÇÃO	OBSERVAÇÕES ESPECIAIS DO LADO DOS ACIONAMENTOS	OUTRAS GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA
----------------------------------	---	--	--------------------------------

Forma Construtiva

Eixo horizontal ou vertical

Quantidade e disposição dos mancais

Alimentado:

Grandes consumidos
 Sistema de Retificação
 Carta Resistiva
 Motores

Exigências do Cliente

Operação sem interrupção
 Tipo de alimentação
 Constancia na tensão
 Contrato de fornecimento de Energia

Usina Térmica (Nuclear)

Variação de Frequência
 Sistema de Alimentação Auxiliar
 Usina de base
 Caldeira (Reator)

APÊNDICE C

EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO

A fim de determinar o deslocamento angular entre as máquinas de um sistema de potência durante um transitório, é necessário resolver a equação diferencial que descreve o movimento do rotor de cada máquina [29].

O torque líquido que atua no rotor baseado nas leis de mecânica relacionadas com massas girantes é:

$$T = \frac{WR^2}{g} w \quad (C.1)$$

onde,

g = Aceleração da gravidade, igual a 32,2 ft/seg²

T = Soma algébrica de todos os torques em ft-b

WR^2/g = Momento de inércia em lb-ft² (dado fornecido pelos fabricantes)

w = Aceleração angular mecânica, rad/seg²

Da teoria de máquinas síncronas, o ângulo elétrico θ_e é relacionado com o ângulo mecânico do rotor por:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (C.2)$$

medidos com relação a uma referência fixa. Onde P é o número de pólos da máquina e a frequência em Hertz é dada por:

$$f = \frac{P}{2} \frac{\text{rpm}}{60} \quad (\text{C.3})$$

Das equações (C.2) e (C.3) o ângulo em radianos é:

$$\theta_e = \frac{60f}{\text{rpm}} \theta_m \quad (\text{C.4})$$

É mais conveniente medir a posição angular com relação a um eixo rotativo em sincronismo, do que com relação a um eixo estacionário.

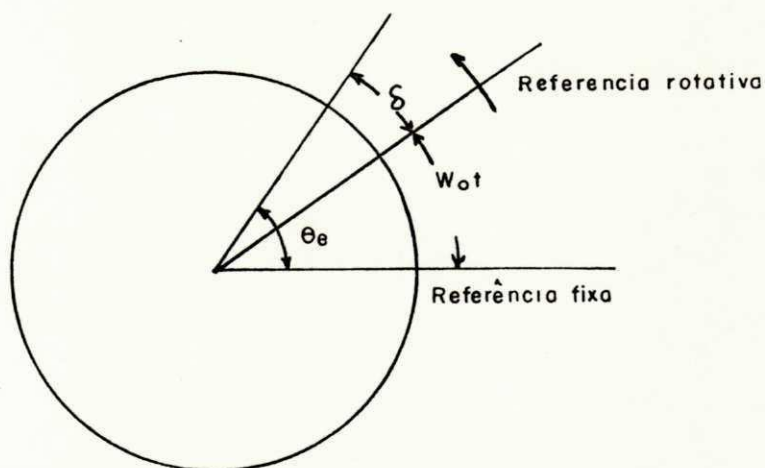


Fig. C.1 - Posição angular do rotor com relação ao eixo rotativo em sincronismo

Considere

$$\theta_e = \delta + \omega_o t \quad (C.5)$$

ou

$$\delta = \theta_e - \omega_o t \quad (C.6)$$

onde

δ = posição angular do rotor em radianos com relação ao eixo rotativo em sincronismo.

ω_o = velocidade angular nominal em rad/seg.

A velocidade angular nesta referência é:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_o \quad (C.7)$$

e a aceleração angular é:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta_e}{dt^2} \quad (C.8)$$

Tomando a derivada segunda em (C.4) e substituindo em (C.8):

$$\frac{d^2_{\delta}}{dt^2} = \frac{60f}{rpm} \frac{d^2_{\theta_m}}{dt^2} \quad (C.9)$$

onde

$$\frac{d^2_{\theta_m}}{dt^2} = \omega$$

substituindo as duas últimas equações em (C.1) o torque líquido é dado por:

$$T = \frac{WR^2}{g} \frac{rpm}{60f} \frac{d^2_{\delta}}{dt^2} \quad \text{lb.ft} \quad (C.10)$$

Para fins de simulação é usual a representação do torque em p.u. O torque base é definido como o torque necessário para produzir a potência nominal da máquina na velocidade nominal, que é:

$$T_{\text{base}} = \frac{\text{Potência base}}{\omega_o} = \frac{\text{Pbase (KVA)} \frac{550}{0.746}}{2\pi \frac{rpm}{60}} \quad (C.11)$$

O torque em p.u é:

$$T = \frac{\frac{WR^2}{g} \frac{2\pi}{f} \frac{rpm}{60} \frac{0.746}{550}}{\text{Base KVA}} \frac{d^2_{\delta}}{dt^2} \quad (C.12)$$

Uma constante muito conhecida e usada na equação de oscilação da máquina, é a constante de inércia H, que é definida como a energia cinética à velocidade nominal armazenada nas partes girantes em KW. seg por KVA.

Note que H exprime uma energia armazenada em p.u. de potência. Este valor não varia muito de uma máquina para outra quando expressa nos valores nominais da máquina.

Cálculo de H:

A energia cinética é dada por:

$$\frac{1}{2} \frac{WR^2}{g} \omega_o^2 \quad (C.13)$$

onde $\omega_o = 2\pi \frac{\text{rpm}}{60}$

portanto,

$$H = \frac{\frac{1}{2} \frac{WR^2}{g} (2\pi)^2 \frac{\text{rpm}^2}{60} \frac{0.746}{550}}{\text{Base KVA}} \quad (C.14)$$

Substituindo em (C.12)

$$T = \frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (C.15)$$

O torque líquido atuando no rotor de um gerador síncrono é dado pela diferença entre o torque mecânico vindo da turbina e o torque elétrico fornecido pelo gerador:

$$T = T_m - T_e \quad (C.16)$$

Por convenção, T_m positivo acelera a máquina e T_e positivo desacelera a máquina.

A equação (C.15) torna-se:

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (C.17)$$

Em p.u., torque e potência são iguais para pequenas variações na velocidade angular.

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \quad (C.18)$$

APÊNDICE D

D1 - DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE PARA UM SISTEMA DE DUAS BARRAS

Sejam: $S_{ij} = V_i I^*$ e $S_{ji} = V_j (-I)^*$, as potências a parentes entregues nas barras i e j respectivamente. Da fig. IV.8.

$$S_{ij} = \hat{V}_t I^* \quad \text{onde } V_t = \text{tensão da barra i}$$

$$I = \frac{V_t - V_B}{Z_{eq}} \quad \text{onde } V_B = \text{tensão da barra j}$$

chamado S_{ij} de SG, potência aparente entregue na barra i:

$$SG = V_t \left(\frac{V_t - V_B}{Z_{eq}} \right)^* = V_t \cdot \frac{V_t^* - V_B^*}{Z_{eq}^*}$$

$$Z_{eq}^* = \frac{|V_t|^2 - V_t V_B^*}{SG}$$

então

$$Z_{eq} = \frac{|V_t|^2 - V_t^* V_B}{SG^*}$$

onde $SG^* = P_g - jQ_g$

e $P_g =$ Potência ativa nos terminais do gerador

$Q_g =$ Potência reativa nos terminais do gerador

A fig. IV.9 mostra o modelo da máquina ligada a uma barra infinita através de uma impedância equivalente, estudado no Capítulo IV.

Um programa computacional (D.2) determina o valor a impedância equivalente, "vista" pela máquina 1:

$$Z_{eq} = 0.0083 + j 0.1327$$

D.2. PROGRAMA QUE CALCULA A IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE

```

C
C-----
C
C      CALCULO DA IMPEDANCIA EQUIVALENTE
C-----
C
C
C      COMPLEX Z,VT,VB,CVT,SG
C      INTEGER L,E
C      OPEN(UNIT=1,NAME='IEQ.DAT',TYPE='OLD')
C      OPEN(UNIT=2,NAME='IEQ.LST',TYPE='NEW')
C      L=1
C      E=2
C      READ(1,1)VT,CVT,VB,SG
1      FORMAT(2F10.4)
C      Z=(CABS(CVT)**2-VB*CVT)/SG
C      REZ=REAL(Z)
C      XEZ=AIMAG(Z)
C      WRITE(E,10)
10     FORMAT(10X,'PARTE REAL',4X,'PARTE IMAGINARIA')
C      WRITE(E,2)VT,VB,SG,REZ,XEZ
2      FORMAT(10X,'VT=',2F10.4,/,10X,'VB=',2F10.4,/,
310X,'SG=',2F10.4,/,10X,'IMPEDANCIA EQUIVALENTE',/,10X,
3.'REZ=',F10.4,4X,'XEZ=',F10.4)
C      STOP
C      END

```

```

PARTE REAL      PARTE IMAGINARIA
VT=      0.9855      0.2211
VB=      1.0200      0.0000
SG=      1.7000      0.0000
IMPEDANCIA EQUIVALENTE
REZ=      0.0085      XEZ=      0.1327

```


BIBLIOGRAFIA

01. ANDERSON, P.M. & FOUAD, A., Power System Control and Stability . Editora Iowa University, Iowa, USA, 1977 . 465p.
02. KIMBARK, E.W., Power System Stability: Synchronous Machines . Dover Publications, Inc., New York, 1968. 322p.
03. SARMA, M. S., Synchronous Machines , Gordon and Breach Science Publishers, Inc, 1979. 582p.
04. PATCHETT, G. N., Automatic Voltage Regulators and Stabilizers . Ptiman Publishing, third Edition, 1970. 585p.
05. VENIKOV, V.A., Transient Process in Electrical Power Systems . Mir Publishers, Moscow second printed, 1980. 501p.
06. MELLO, F.P.de & CONCORDIA , C., Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control . IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, pp 190-196, Apr. 1969.

07. IEEE COMMITTEE REPORT., Excitation System Models for Power System Stability Studies . IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, n^o 2, pp 494-509, Feb. 1981.
08. IEEE COMMITTEE REPORT, Computer Representation of Excitation Systems . IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-87, pp. 1460-1464, June 1968.
09. IEEE COMMITTEE REPORT, Proposed Excitation System Definitions for Synchronous Machines . IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, n^o 8, pp. 1248-1258, Aug. 1969.
10. JACOVIDES, L.J. & ADKINS, B., Effect of Excitation Regulation on Synchronous Machine Stability . Proc. IEEE, vol. 113, n^o 6, pp. 1021-1034, June 1966.
11. CONCORDIA, C., Steady-State Stability of Synchronous Machines as Affected by Voltage - Regulator Characteristics . Transaction AIEE, vol. 63, May 1944, pp. 215-220.
12. FERGUSON, R.W. et alli, Analytical Studies of the Brushless Excitation System . Transaction AIEE, pp.1815-1820, Feb. 1960.
13. WHITNEY, E.C. et alli, An Electric Utility Brushless Excitation System AIEE Transaction PAS. vol. 78, Feb. pp 1821-1824.

14. SIEMENS, Sistema de Excitação Thyripol , 1980.
15. SILVA, E.R.CABRAL DA, Controles Eletrônicos em Sistemas Estáticos de Excitação e em Sistemas de Compensação Estática de Potência Reativa . UFPb-CCT-DEE, Campina Grande-Pb., Dez. 1981.
16. BARNES, H.C. et alli, Alternator - Rectifier Exciter for Cardinal Plant 724-MVA Generator . IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-87, pp. 1189 - 1198, Apr. 1968.
17. HUMPHRIES, H. J. & FAIRNEY, W., Excitation Rectifier Schemes for Large Generators . Proc. IEE, vol. 119, nº 6, pp. 661-671, June 1972
18. SILVA, A. F. da & BARRADAS, O., Sistemas de Energia . Livros Técnicos e Científicos: Embratel, 198, 103lp.
19. HARTUG, E.C. et alli, A Rotating Thyristor Excitation System for Hidroelectric Generators . IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, pp. 74-81. Sept./oct. 1972.
20. DILLMAN, T. L. et alli, A High Initial Response Brushless Excitation System . IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, pp. 97-102, Sept./oct. 1971.

21. CODRIGTON, J. B. et alli, Computer Representation of Electrical System Interaction with a Hidraulic Turbine and Pestock . IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, nº 8 pp. 2611-2617, Aug. 1982.
- 22 YOUNG, C. C., Equipament and System Modeling for Lage Scale Stability Studies . IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems . pp. 99-109, Jan/Feb. 1972.
23. BYERLY R. T. & KIMBARK, E. W., Stability of Large Electric Power Systems . New York Press, 1974, 571p.
24. SILVA, MARIA DA GUIA, Projeto de Sinais Estabilizantes em Sistemas de Potência usando Técnicas de Controle Clásico e Otimização . Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-Pb., 1983.
25. KEAY, F. W. et alli, Design of Power System Stabilizer Sensing Frequency Deviation . IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems", vol. PAS-90, pp.707-712, Mar./Apr. 1971
26. WATSON, W. & MANCHUR, G., Experience with Supplementary Damping Signals for Generator Static Excitation Systems . IEEE Transaction on Power Systems, vol. PAS-92, pp. 199-204. Jan./Feb. 1973.

27. BAYNE, P. P. et alli, Static Exciter Control to Improve Transient Stability . IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, pp. 1141-1146. July/Aug. 1975.
28. MOTA, W. S., Optimal Control Techniques in Design of Power System Stabilizers . Ph.D. Thesis, Waterloo, Ontario, 1981.
29. MOTA, W. S., Notas de Aula , Curso de Estabilização de Sistemas de Potência - GSP-DEE, Campina Grande, 1982
30. MOTA, W. S., Programa de Estabilidade de Sistemas de Potência. GSP-DEE, Campina Grande, 1981.
31. ELGERD, O. I., Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1977. 604p.
32. HALLER, W., Excitation Limit Controllers for Synchronos Generators. Brown Boveri Review, vol. 57, nº 2, pp. 60-65, 1970.
33. OGATA, K., Engenharia de Controle Moderno . Prentice Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1982, 929p.
34. EGGELING, H., Control Characteristics for Synchronous Machines. Brown Boveri, vol.60, pp. 212-217, May 1973.

35. EGDELING, H., Limiting the Excitation of Synchronous Machines. Brown Boveri Review, vol. 63, pp. 682-687, Nov. 1976.
36. SAITO, O. et alii, High Initial Response Excitation System Using Magnetically Controlled Thyristor Amplifier. Hitachi Review, vol. 25, n^o 11, pp. 375-380, 1976.
37. GRIFFITH, M. S., Modern AC. Generator Control Systems: Some Plain and Painless Facts. IEEE Transaction on Industry Applications, vol. IA-14, n^o 6, pp. 481-491, Nov./Dec. 1978.
38. LARSEN, e. V. & SWANN, D. A., Applying Power Systems Stabilizers, Part II: General Concepts, Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts, Part III: Practical Considerations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp. 3017-3046, June 1981
39. DINELEY, J. L. & FENWICK, P. J., The Effects of Prime Mover and Excitation Control on Stability of Large Steam Turbine Generators. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, pp. 1613-1623, 1974.
40. DE MELLO, F.P de & LASKOWSKI, T. F., Concepts of Power System Dynamic Stability. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, n^o 3, pp. 827-833, May/June 1975.

41. PENEDER, F. & BUTZ, H., Exciter Systems for Three - Phase Generators in Industrial and Medium-Size Stations , Brown Boveri Review, pp. 41-50, jan. 1974.
42. GLAVITSCH, H., On the Choise of Control Prameters of Excitation Systems for Large Turbogenerators. Brown Boveri Review, vol. 61, pp.207-216, May 1974.
43. GEHLOT, N. S., Electronic Controls for Hydro Bower Generation . Curso: Tópicos Seleccionados em Sistemas de Potência, UFPb-CCT-DEE, Campina Grande, 1978.
44. MATTOS, F.C.G., Ajustes de Parâmetros de Reguladores de Tensão e Sinais Estabilizadores em Sistemasse Potên^{cia}. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopólis, Mar. 1984.
45. DEEP, G. S. et alli, Circuito de Disparo Cossenoidal para Retificadores . III Encontro Nacional de Automáti^{ca}, ANAIS, pp. 40-49, Campinas, jul. 1982.
46. SCR MANUAL - GENERAL ELECTRIC CO.. Syracuse, pp. 236-238, New York, 1972.
47. BEAGLES, P. H. et alli - Generator and Power System Performance with Generrex Excitation System. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-95, pp. 489-493, Mar./Apr. 1976.

48. OLIVEIRA, S. E. M. & NETO, L.A. S., "Estabilidade Dinâmica com Sinais Estabilizadores". V SNPTEE, Grupo IV (GSP), Recife, 1979.
49. MELLO, F.P. de et alli . "A Power System Stabilizer Design Using Digital Control". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, pp. 2860 - 2868, Aug. 1982.
50. DUDLER, A., "Unitrol Voltage Regulators fo Synchronous Generators. Brown Boveri Review, nº 1, pp. 41-48, 1970.
51. DANDENO, A. et alli - Effect of High-Speed Rectifier Excitation Systems on Generator Stability Limits. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, pp. 190-196, Jan. 1963.
52. RAMOS, A.J.P. - Determinação dos Parâmetros de um Sistema de Excitação a partir da sua Resposta no Tempo. IV SNPTEE, Grupo IV (GSP), Rio de Janeiro, 1977.
53. GIBBARD, M.J. & KAN, Q.H. - Identification of Excitation System Parameters. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, pp. 1201-1207, July/Aug. 1975.
54. TRANSFER FUNCTIONS OF EXCITATION SYSTEMS. Voltage Regulator UNITROL Applied in Shunt Excitation Systems (excitation source from generator terminals) with Controlled Rectifiers, Brown Boveri: Publicação Interna.