

LUIS REYES ROSALES MONTERO

PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO DIGITAL
DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO E REGULADOR DE TENSÃO
PARA UM MICROGERADOR SÍNCRONO DE 3KVA

Dissertação apresentada à Coordenação
dos cursos de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento das exigências
para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Elétrica.

AREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO DA ENERGIA
CONVERSÃO E CONTROLE

ORIENTADORES: WELLINGTON SANTOS MOTA
CURSINO BRANDÃO JACOBINA

CAMPINA GRANDE - PARAIBA

ABRIL DE 1991



M778p

Montero, Luis Reyes Rosales

Projeto, implementação e simulação digital do sistema de excitação e regulador de tensão para um microgerador síncrono de 3KVA / Luis Reyes Rosales Montero. - Campina Grande, 1991.

77 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.

1. Geracao de Energia Elétrica - 2. Microgerador Síncrono 3. Dissertação I. Mota, Wellington Santos, Ph.D. II. Jacobina, Cursino Brandao, Dr. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 621.311(043)

LUIS REYER ROSALES MONTERO

30 04 91

Wellington Santos Mota
WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFPB
Representador

Cursino Brandao Jacobina
CURSINO BRANDAO JACOBINA, Dr., Ing.
Representador

Antonio Carlos Vasquez Lima
ANTONIO CARLOS VASQUEZ LIMA, Dr., Ing.
Representador

Fernando Guisasa
FERNANDO GUISASA, Ph.D., UFPB

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Santa Cruz (em memória) e Laida

A minha esposa Edilene

A meus filhos Berman, Vanessa e Priscila

AGRADECIMENTO

Aos Profs. Cursino Brandão Jacobina e Wellington Santos Mota, pela orientação e ajuda no desenvolvimento da pesquisa.

Aos Profs. Antonio Marcus Nogueira Lima e Francisco das Chagas Guerra, por aceitarem participar da Banca Examinadora desta tese.

Aos meus colegas de trabalho Fabiano Salvadori, Fernando Diniz, João Viana e a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta com ações concretas ou palavras de incentivo para realização desta pesquisa.

A Universidade Federal da Paraíba e ao CNPq pelas condições oferecidas para a realização do curso de mestrado.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo contribuir nos estudos de estabilidade dinâmica em sistemas de geração de energia elétrica, dando ênfase ao projeto, simulação e implementação de um sistema de excitação e regulador de tensão para um microgerador síncrono de 3kva. Uma ponte trifásica simétrica com circuitos de gatilhos com sincronismo senoidal alimenta o campo do microgerador. Um controlador proporcional integral é utilizado no controle da tensão do microgerador. Modelos matemáticos para simulação dinâmica do microgerador, ponte trifásica e regulador de tensão, são desenvolvidos para efeito de comparação dos resultados obtidos.

SUMMARY

The main goal of this work is contribute for dynamic stability studies of electric energy generation systems, emphasizing design, implementation and simulation of exciting and voltage regulator in a 3kva Micro-synchronous-generator. For this work, a symmetrical three-phase bridge with sinusoidal gate control was used for the static excitation system.

A proportional and integral controller was adapted for the micromachine voltage control. In order to compare with experimental results, simulation models of micromachine, three-phase bridge and voltage regulator has been developed.

INDICE DE FIGURAS

| | | |
|--------------|---|----|
| FIGURA I.1 | Sistema de excitação e regulador de tensão automático de tensão para um microgerador síncrono de 3kva..... | 4 |
| FIGURA I.2 | Diagramas de blocos do sistema de excitação e regulador de tensão automático de tensão para um microgerador síncrono de 3kva..... | 5 |
| FIGURA II.1 | Representação esquemática da máquina síncrona | 7 |
| FIGURA II.2 | Diagrama de blocos do sistema de controle da tensão do microgerador..... | 21 |
| FIGURA II.3 | Fluxograma do programa do microgerador síncrono 3kva..... | 23 |
| FIGURA II.4 | Fluxograma do programa do sistema de excitação e regulador de tensão..... | 24 |
| FIGURA II.5 | Transitório da tensão terminal, tensão de controle e tensão de excitação do microgerador originado pela entrada e saída de carga..... | 26 |
| FIGURA III.1 | (a) Ponte trifásica simétrica controlada | 35 |
| FIGURA III.1 | (b) Forma de onda da tensão E_{da} | 35 |
| FIGURA III.2 | Caraterística ideal da ponte | 37 |
| FIGURA III.3 | Circuito térmico equivalente do dissipador... | 40 |
| FIGURA III.4 | Transformadores de sincronismo | 42 |
| FIGURA III.5 | Circuito de geração das senoides de sincronismo..... | 45 |
| FIGURA III.6 | Circuito de geração do ângulo de gatilho .. | 48 |

| | | |
|--------------|--|----|
| FIGURA III.6 | (a) Diagrama de Sinais do circuito comparador | 49 |
| FIGURA III.6 | (b) Sinais do circuito limitador de faixa ... | 49 |
| FIGURA III.6 | (c) Sinais do circuito detetor do ângulo de gatilho | 49 |
| FIGURA III.6 | (d) Diagrama do circuito formador de gatilho. | 49 |
| FIGURA III.7 | Circuito amplificador de pulso de gatilho. . | 51 |
| FIGURA III.8 | Forma de onda experimental da tensão de campo do microgerador com carga de 1500 Watts..... | 52 |
| FIGURA III.9 | Forma de onda experimental da tensão do campo microgerador em vazio | 53 |
| FIGURA IV.1 | Ponte retificadora de sinal a diodos | 55 |
| FIGURA IV.2 | Filtro de sinal RC | 55 |
| FIGURA IV.3 | Diagrama de blocos do circuito de regulação de tensão no domínio de Laplace | 60 |
| FIGURA IV.4 | Diagrama de blocos reduzido do circuito de regulação de tensão do microgerador | 60 |
| FIGURA IV.5 | Diagrama de blocos simplificado do circuito de regulação de tensão do microgerador | 63 |
| FIGURA IV.6 | Diagrama de blocos do modelo do sistema de regulação de tensão do microgerador síncrono | 63 |
| FIGURA IV.7 | Circuito eletrônico do regulador PI | 66 |
| FIGURA IV.8 | Circuito de regulação de tensão do microgerador de 3kva | 69 |
| FIGURA IV.9 | (3) Tensão de saída do regulador PI $V_{com}(t)$.. | 71 |
| FIGURA IV.9 | (1) Tensão contínua proporcional a tensão terminal..... | 71 |
| FIGURA IV.10 | (1) Tensão de saída da ponte a diodo V_{tr} | 71 |
| FIGURA IV.10 | (3) Tensão de saída do filtro RC $V_{t\pi}(t)$ | 71 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | | |
|------------|---|----|
| TABELA 3.1 | Reatâncias do microgerador (p.u) | 30 |
| TABELA 3.2 | Constantes de tempo do microgerador | 31 |
| TABELA 3.3 | Características do motor CC | 32 |
| TABELA 3.4 | Tabela de verdade do circuito de memória..... | 47 |

LISTA DE PRINCIPAIS SÍMBOLOS

| | |
|------------|---|
| A | Constante de aproximação |
| B | Constante de aproximação |
| d | Eixo direto |
| E_{da} | Tensão de saída da ponte trifásica simétrica (V) |
| E_{do} | Tensão de saída máxima da ponte trifásica simétrica (V) |
| F_1 | Conjugado de atrito (p.u) |
| F_n | Conjugado mecânico (p.u) |
| H | Constante de inércia (kWs/kVA) |
| G' | Constante |
| G'' | Constante |
| i_d | Corrente de armadura do eixo d (p.u) |
| i_q | Corrente de armadura do eixo q (p.u) |
| i_{kd} | Corrente no enrolamento amortecedor do eixo d (p.u.) |
| i_{kq} | Corrente no enrolamento amortecedor do eixo q (p.u.) |
| i_{fd} | Corrente no enrolamento do campo do eixo d (p.u.) |
| I_{Tmed} | Valor médio da corrente máxima do tiristor (A) |
| I_{TRMS} | Corrente RMS) máxima que circula em cada tiristor (A) |
| J | Monmento de inercia (kWs/kVa) |
| K_a | Ganho do circuito de regulação de tensão |
| K_F | Ganho do filtro de sinal RC |
| K_{MG} | Ganho do microgerador |
| K_R | Ganho da ponte retificadora a diodos |
| K_P | Ganho da ponte trifásica simétrica |
| K_T | Ganho do transformador |

| | |
|------------|--|
| L | Operador de laplace |
| L_0 | Indutância do circuito de comutação (henry) |
| L_{ra} | Indutância do circuito do campo do gerador (p.u.) |
| L_T | Indutância do transformador (henry) |
| P | Operador diferencia (d/dt) |
| r_a | Resistência da armadura (p.u.) |
| r_{rd} | Resistência de campo, eixo d (p.u.) |
| r_{kd} | Resistência de amortecedor, eixo d (p.u.) |
| r_{kq} | Resistência de amortecedor, eixo q (p.u.) |
| S | Variável complexa de Laplace |
| T_{eL} | Conjugado eletromagnético (p.u) |
| T_n | Parâmetro do regulador PI |
| T_i | Parâmetro do regulador PI |
| T'_{d0} | Constante de tempo de curto-circuito transitória, eixo d (s) |
| T''_{d0} | Constante de tempo de curto-circuito sub-transitória, eixo d (s) |
| T'_{d0} | Constante de tempo de circuito aberto, transitório no eixo direto (s) |
| T''_{d0} | Constante de tempo do circuito aberto, subtransitória, eixo d (s) |
| T''_{q0} | Constante de tempo de circuito aberto subtransitório no eixo em quadratura (s) |
| T_p | Constante de tempo da ponte trifásica simétrica (s) |
| T''_{q0} | Constante de tempo de curto-circuito sub-transitória, eixo q (s) |
| T_{kd} | Constante de tempo do circuito amortecedor, eixo d (s) |
| T_{PF} | Constante de tempo do filtro RC e da ponte (s) |

| | |
|-------------|---|
| T_F | Constante de tempo do filtro RC (s) |
| V_{com} | Tensão de saída do regulador PI (V) |
| V_d | Tensão da armadura no eixo d (p.u.) |
| V''_d | Tensão proporcional ao fluxo no eixo d (p.u.) |
| V_q | Tensão da armadura no eixo q (p.u.) |
| V'_q | Tensão proporcional ao fluxo do eixo q (p.u.) |
| V_L | Tensão eficaz fase-fase que alimenta a ponte trifásica simétrica ($V_{ab}, V_{ac}, V_{bc}, V_{ba}, V_{ca}, V_{cb}$) (V) |
| V_N | Tensão eficaz fase neutro (V_a, V_b, V_c) (V) |
| V_{tr} | Tensão de saída do filtro RC de sinal (V) |
| V_{tm} | Tensão eficaz de linha do secundário do transformador de sinal (V) |
| V_{tr} | Tensão média da ponte retificadora a diodo (V) |
| V_{TMAX} | Tensão eficaz reversa máxima do tiristor (V) |
| ω_o | Velocidade angular síncrona (rad/s) |
| ω_r | Velocidade angular do rotor do microgerador (rad/s) |
| ω | Velocidade angular normalizada (p.u.) |
| X_a | Reatância de dispersão de armadura (p.u.) |
| X_{fd} | Reatância própria de campo, eixo d (p.u.) |
| X_{kq} | Reatância do amortecedor, eixo q (p.u.) |
| X_{md} | Reatância de magnetização, eixo d (p.u.) |
| X_{mq} | Reatância de magnetização, eixo q (p.u.) |
| α | Ângulo de gatilho dos tiristores da ponte trifásica simétrica (graus) |
| Φ_d | Fluxo concatenado do eixo d (Wb) |
| Φ_q | Fluxo concatenado do eixo q (Wb) |
| Φ_{fd} | Fluxo concatenado do campo eixo d (Wb) |

Φ_{kd} Fluxo concatenado do amortecedor eixo d (Wb)
 Φ_{kq} Fluxo concatenado do amortecedor eixo q (Wb)
 θ Angulo de carga (rad)
 ϕ Margem de fase (graus)

SUMARIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | |
| 1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS..... | 1 |
| 1.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 1 |
| 1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA..... | 2 |
| 1.4 - SISTEMA DE EXCITAÇÃO E REGULADOR DE TENSÃO A SER IMPLEMENTADO..... | 3 |
| 1.4.1 - Descrição do do sistema de excitação e regu- lação de tensão para um microgerador síncrono de 3kva..... | 4 |
| 1.5 - CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS SUBSEQUENTES..... | 6 |
| 2 - MODELO MATEMATICO DO MICROGERADOR PARA SIMULAÇÃO DINÂ- MICA..... | 7 |
| 2.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES..... | 7 |
| 2.1.1 - Considerações sobre a tensão base no rotor.... | 12 |
| 2.2 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO GERADOR SÍNCRONO..... | 18 |
| 2.3 - SIMULAÇÃO DIGITAL DO MICROGERADOR..... | 20 |
| 2.4 - MODELO PARA SIMULAÇÃO DINÂMICA DO REGULADOR DE TENSÃO E SISTEMA DE EXCITAÇÃO..... | 21 |
| 2.5 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MICROGERADOR COM RE- GULAÇÃO DE TENSÃO..... | 25 |
| 2.6 - CONCLUSÃO..... | 26 |
| 3 - MICROGERADOR SÍNCRONO E SISTEMA DE EXCITAÇÃO..... | 27 |
| 3.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINAR..... | 27 |
| 3.2 - LABORATÓRIO DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA... | 27 |

| | |
|--|----|
| 3.3 - CARACTERISTICAS DO MICROGERADOR..... | 28 |
| 3.3.1 - Rotor..... | 29 |
| 3.3.2 - Estator..... | 29 |
| 3.3.3 - Valores por unidade..... | 30 |
| 3.3.4 - Impedância..... | 30 |
| 3.3.5 - Constantes de tempo..... | 30 |
| 3.4 - MOTOR CC (Microturbina)..... | 31 |
| 3.5 - EXCITATRIZ DO MICROGERADOR..... | 32 |
| 3.5.1 - Projéto de uma ponte trifásica simétrica..... | 32 |
| 3.5.2 - Condições ideais para funcionamento da Ponte trifásica simétrica..... | 32 |
| 3.5.3 - Funcionamento..... | 33 |
| 3.5.4 - Cálculo de tensão contínua ideal "E _{da} "..... | 34 |
| 3.5.5 - Função de transferência da ponte trifásica Simétrica..... | 36 |
| 3.5.6 - Característica ideal da ponte trifásica simétrica..... | 37 |
| 3.5.7 - Condições reais para funcionamento da ponte... | 37 |
| 3.5.8 - Ângulo de comutação..... | 38 |
| 3.5.9 - Escolha do SCR..... | 38 |
| 3.5.9.1 - Cálculo da corrente do tiristor..... | 38 |
| 3.5.9.2 - Cálculo da tensão reversa máxima do tiris- tor..... | 39 |
| 3.5.9.3 - Cálculo do dissipador..... | 39 |
| 3.5.9.4 - Cálculos térmicos..... | 40 |
| 3.5.10 - Fusíveis para tiristores..... | 41 |
| 3.5.11 - Circuito "snubber"..... | 41 |
| 3.5.12 - Transformadores de sincronismo..... | 42 |

| | |
|--|----|
| 3.5.13 - Circuito de gatilho de tiristores..... | 42 |
| 3.5.13.1 - Obtenção das senoides de sincronismo..... | 43 |
| 3.5.13.2 - Limitador da tensão de controle..... | 44 |
| 3.5.13.3 - Comparador de sinal de controle e sinal de sincronismo..... | 46 |
| 3.5.13.4 - Detetor de ângulo de gatilho " α "..... | 46 |
| 3.5.13.5 - Circuito formador do sinal de gatilhamento | 47 |
| 3.5.13.6 - Inibidor de pulso..... | 50 |
| 3.5.13.7 - Amplificador adaptador 5V/15V CC..... | 50 |
| 3.4.13.8 - Circuitos amplificadores de pulso drivers | 50 |
| 3.5.14 - Resultados experimentais da ponte trifásica simétrica..... | 52 |
| 3.6 - CONCLUSÃO..... | 53 |
| 4 - REGULADOR DE TENSÃO PARA MICROGERADORES..... | 54 |
| 4.1 - INTRODUÇÃO..... | 54 |
| 4.2 - PONTE RETIFICADORA A DIODOS..... | 54 |
| 4.3 - FILTRO DE SINAL RC..... | 56 |
| 4.3.1 - Função transferência do filtro de sinal RC.... | 56 |
| 4.4 - DIAGRAMAS DE BLOCOS E FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA.... | 58 |
| 4.5 - PEQUENAS CONSTANTES DE TEMPO..... | 61 |
| 4.6 - ESCOLHA DO REGULADOR..... | 62 |
| 4.7 - CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO REGULADOR PI..... | 64 |
| 4.8 - CIRCUITO DO REGULADOR PROPORCIONAL INTEGRAL..... | 66 |
| 4.8.1 - Compensação da corrente de polarização do cir- cuito do regulador PI..... | 67 |

| | |
|---|----|
| 4.9 - CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO REGULADOR PI CONSIDERANDO OS EFEITOS DOS ENROLAMENTOS AMORTECEDORES DO MICROGERADOR | 67 |
| 4.10 - LIMITADOR DO REGULADOR PI..... | 68 |
| 4.11 - PROTEÇÃO POR SOBRETENSÃO DO MICROGERADOR..... | 68 |
| 4.12 - CIRCUITO GENERALIZADO PARA DIFERENTES AJUSTES DE T_n e T_i | 70 |
| 4.13 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO REGULADOR DE TENSÃO DO MICROGERADOR..... | 70 |
| 4.14 - CONCLUSÃO | 72 |
| 5 - CONCLUSÕES GERAIS..... | 73 |
| COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS.... | 73 |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES..... | 74 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 75 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O estudo do comportamento dinâmico de sistemas de geração de energia elétrica requer a formulação de equações algébricas e diferenciais de natureza não linear. Para fins de projeto e ajuste de controladores desses sistemas, torna-se imprescindível a utilização de modelos linearizados equivalentes de ordem reduzida. A redução da ordem do sistema torna viável a aplicação de técnicas de controle de fácil implementação.

No caso específico do controle automático da tensão do microgerador síncrono, com realimentação, dispõe-se de um conjunto de parâmetros que devem ser ajustados de forma a proporcionar rapidez e precisão no controle da tensão.

1.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A estabilidade dinâmica de reguladores de tensão de geradores síncronos tem sido objeto de estudo de vários autores. Kimbark, (1956) mostra vários modelos de reguladores de tensão utilizando excitatriz rotativa (geradores CC), de resposta muito lenta. Com o aparecimento dos tiristores de potência no início da década de 60 deu origem aos sistemas de excitação estáticos de resposta rápida.

Anderson (1977) mostra vários modelos de reguladores de tensão proporcionais utilizando excitatriz estática (tiristores).

Hammons (1971) projetou um microgerador síncrono pólos salientes de 3kva, para pesquisas em estabilidade de sistemas de potência. A importância deste projeto permitiu a fabricação do microgerador pela Mawdsley's LTD, (1971) para fins de investigações em dinâmica e controle de sistemas de potência.

Com a fabricação do microgerador, várias universidades adquiriram-no, originando vários trabalhos. Por exemplo, Devotta (1986) desenvolve um regulador de tensão proporcional para um microgerador adquirido da Mawdsley's LTD.

A Siemens (1980) desenvolveu o sistema de excitação/regulação de tensão "tiripol" utilizando o regulador Proporcional Integral, adquirido em 1987 pela CHESF-Companhia Hidroelétrica do São Francisco.

1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

A presente pesquisa tem como objetivo projetar, implementar e simular um sistema de excitação estático e regulação de tensão no microgerador síncrono de 3KVA, adquirido da Mawdsley's LTD, para suporte no campo de ensino e pesquisa na área de dinâmica e controle de sistemas de potência.

Na simulação digital são desenvolvidos:

- 1) Um programa que simula o funcionamento real de uma ponte trifásica simétrica como sistema de excitação estático comandada

por um regulador de tensão proporcional integral para excitar o microgerador.

2) Um programa que simula o funcionamento do microgerador através de Modelos matemáticos que representam uma máquina síncrona.

Na implementação são desenvolvidos:

1) Circuitos de sincronismo senoidal para gatilhamento dos tiristores da ponte trifásica simétrica e que constituem uma abordagem moderna e podem ser usados em sistemas de excitação estático de geradores síncronos de grande potência, bem como, no controle da velocidade do motor CC que está acoplado ao microgerador.

2) Filtros de medição e regulador proporcional integral com parâmetros de ajuste independentes.

1.4 - SISTEMA DE EXCITAÇÃO E REGULAÇÃO DE TENSÃO A SER IMPLEMENTADO

A figura I.1. apresenta um sistema de excitação e regulador automático para microgeradores síncronos, similar aos sistemas desenvolvidos pela Siemens para a usina de Paulo Afonso IV e Recife II, da CHESF.

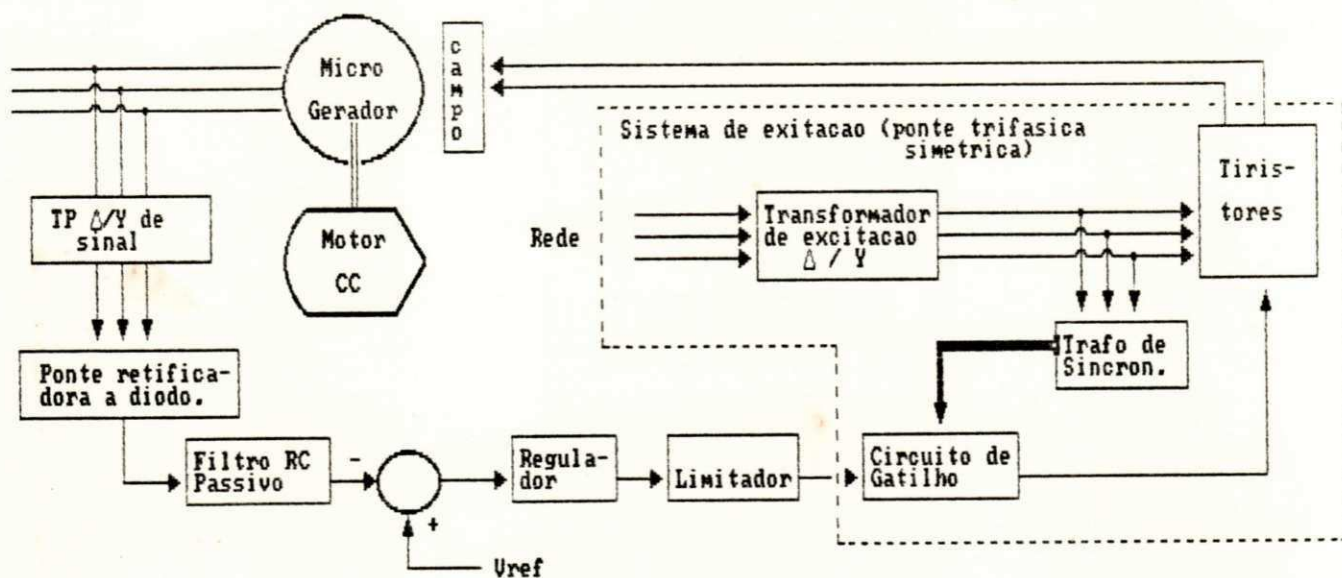


Fig.1.1 - Sistema de excitação e regulador de tensão automático de tensão para um microgerador síncrono de 3kva

1.4.1 - Descrição do sistema de excitação e regulação de tensão para um microgerador síncrono de 3kva.

A fonte de energia primária é obtida através de um motor de corrente contínua acoplado ao eixo do rotor do microgerador. A corrente de excitação é obtida através de um sistema de excitação estático (ponte trifásica simétrica controlada) utilizando anéis coletores. A tensão terminal gerada do microgerador é controlada automaticamente através de uma malha de realimentação, composta por um transformador trifásico de potencial, ponte retificadora a diodos, filtro RC, regulador de tensão, limitador de tensão do regulador e o sistema de excitação estático ligado ao campo do microgerador, (cf., figura 1.2).

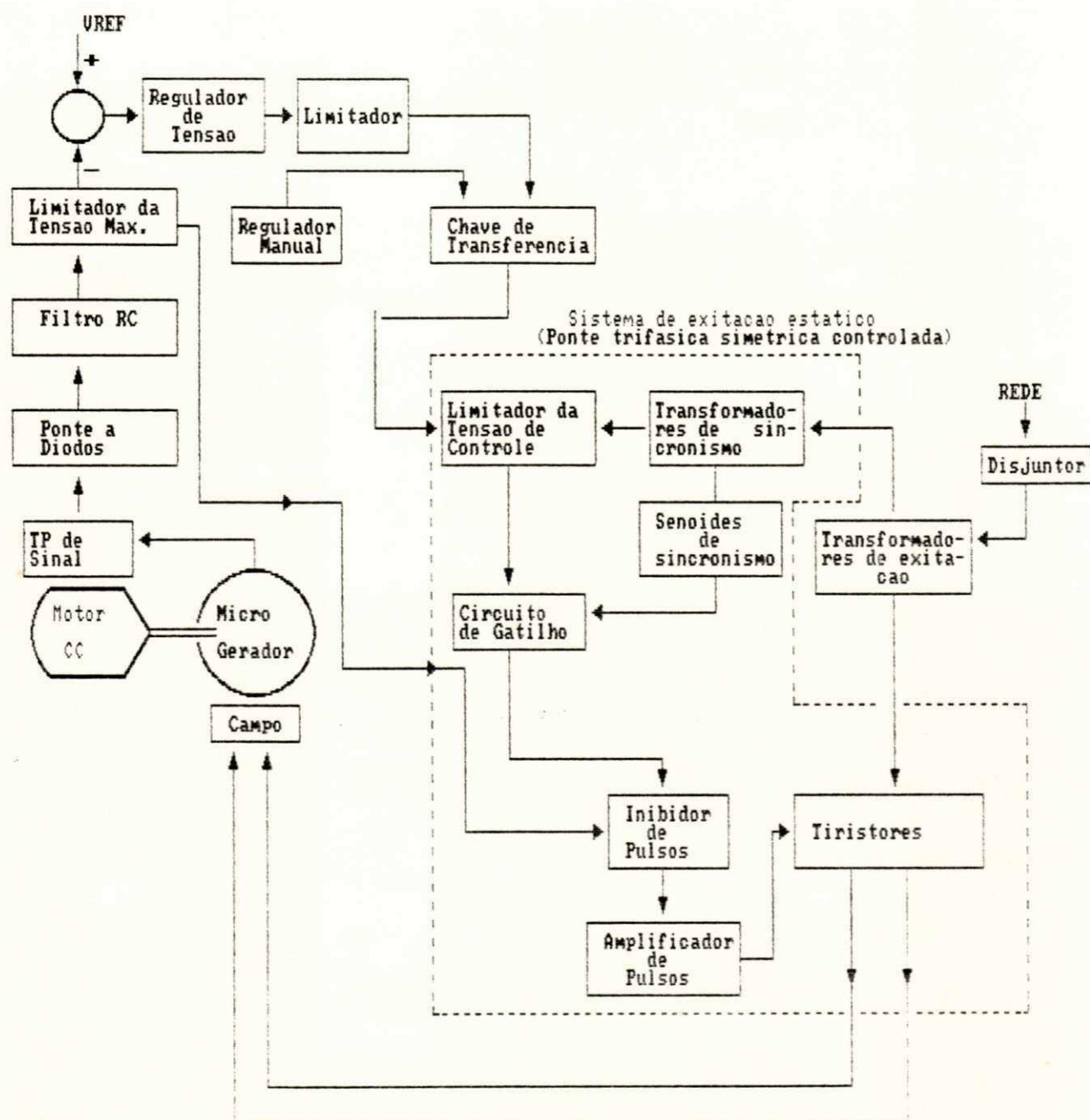


Fig.I-2 - Diagrama de blocos do sistema excitacao e regulador de tensao automatico para um microgeradores sincronos de 3kva

1.5 - CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS SUBSEQUENTES

No Capítulo 2 apresenta-se:

- Modelos matemáticos para simulação dinâmica do microgerador em função das reatâncias e das constantes de tempo fornecidas pelo fabricante, bem como das correntes estatóricas e tensão de campo; fluxogramas de programas da simulação digital, da ponte trifásica simétrica, microgerador e regulador de tensão; resultados da simulação e conclusão.

No capítulo 3 apresenta-se:

- Uma breve apresentação dos laboratórios de microgeração de energia elétrica, características de fabricação do microgerador, projeto de uma ponte trifásica simétrica controlada com circuitos de gatilhamento com sincronismos senoidais a ser utilizada no sistema de excitação do microgerador, resultados experimentais e Conclusão.

No Capítulo 4 apresenta-se:

- Projeto, circuitos e diagramas de blocos do sistema de regulação de tensão, resultados experimentais e conclusão.

No Capítulo V apresenta-se:

- conclusões gerais, comparação de resultados e sugestões para trabalhos posteriores.

CAPÍTULO 2

MODELO MATEMÁTICO DO MICROGERADOR PARA SIMULAÇÃO DINÂMICA

2.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Este modelo é desenvolvido a partir das equações de Park.

As transformações trifásicas em bifásicas são discutidas em Park (1933), Ranking (1945), Jacobina (1984) e Mota (1986).

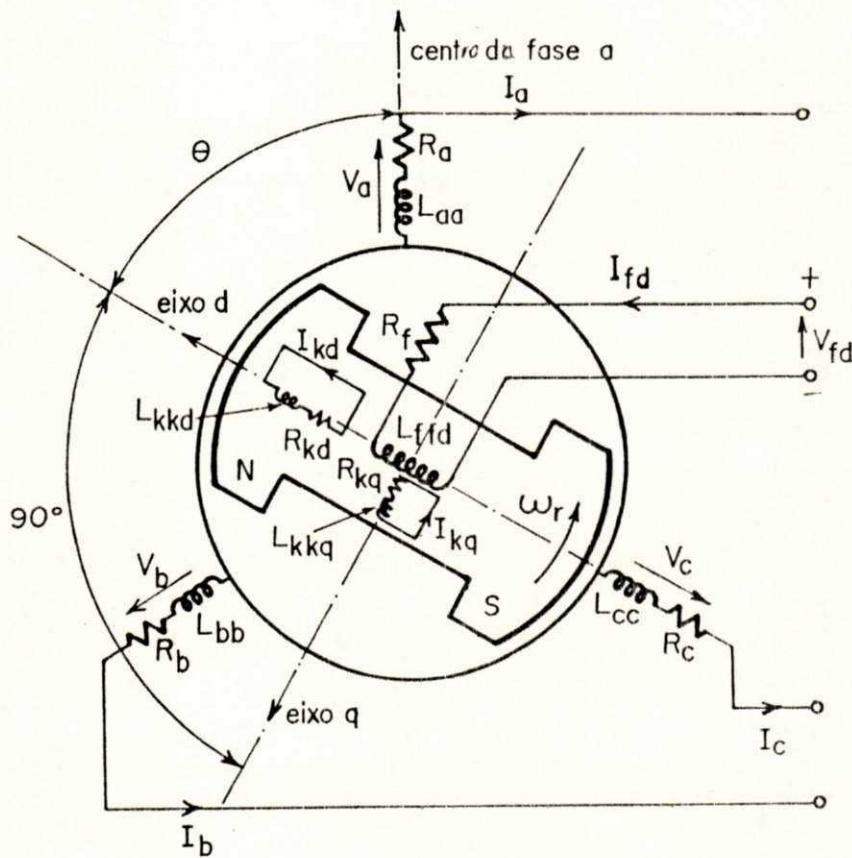


Figura II.1 Representação esquemática da máquina síncrona

A figura II.1 mostra esquematicamente uma máquina síncrona com dois pólos, caracterizada por três enrolamentos estatóricos

defasados de 120 graus elétricos, o rotor possui dois enrolamentos amortecedores alocados nos eixos d e q e um enrolamento de campo no eixo d.

As equações das tensões do microgerador em componentes d,q expressas em (p.u.) são apresentadas na seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r_a + \frac{p}{\omega_0} X_d) & \omega X_d & \frac{p}{\omega_0} X_{md} & \frac{p}{\omega_0} X_{md} & -\omega X_{md} \\ -\omega X_d & -(r_a + \frac{p}{\omega_0} X_q) & \omega X_{mq} & \omega X_{mq} & \frac{p}{\omega_0} X_{mq} \\ -\frac{p}{\omega_0} X_{md} & 0 & (r_{fd} + \frac{p}{\omega_0} X_{fd}) & \frac{p}{\omega_0} X_{mfd} & 0 \\ -\frac{p}{\omega_0} X_{mq} & 0 & \frac{p}{\omega_0} X_{mfd} & (r_{kd} + \frac{p}{\omega_0}) X_{kd} & 0 \\ 0 & -\frac{p}{\omega_0} X_{md} & 0 & 0 & (r_{kq} + \frac{p}{\omega_0}) X_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

onde: X_d, X_q, X_{kd}, X_{kq} , são as reatâncias próprias e X_{md}, X_{mq}, X_{mfd} são as reatâncias mútuas, $\omega_0 = 2\pi 60$ (rad/s) = velocidade angular síncrona, $p = d/dt$ = operador diferencial, ω_r = velocidade angular do rotor, $w = \omega_r/\omega_0$ = velocidade angular normalizada.

Equações de fluxos concatenados no eixo direto

$$\begin{aligned} \Phi_d &= -X_d \cdot i_d + X_{md} \cdot i_{fd} + X_{md} \cdot i_{kd} \\ \Phi_{fd} &= -X_{md} \cdot i_d + X_{fd} \cdot i_{fd} + X_{mfd} \cdot i_{kd} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\Phi_{kd} = -X_{md}.i_d + X_{mrd}.i_{rd} + X_{kd}.i_{kd}$$

Equações de fluxo concatenados no eixo em quadratura

$$\Phi_q = -X_d.i_q + X_{mq}.i_{kq}$$

$$\Phi_{kq} = -X_{mq}.i_q + X_{kq}.i_{kq} \quad (2.3)$$

Equações de movimento

$$p^2\theta = (F_n - T_{e1} - F_1)/J \quad (2.4)$$

$$w = 1 + p\theta/w_0 \quad (2.5)$$

onde: J e o momento de inercia do sistema de rotação o qual é dado em (p.u.), definido por:

$$J = 2H/w_0 \quad (2.6)$$

onde: H e a constante de inercia em (kWs/kVA)

Torque Eletromagnético

$$T_{e1} = \Phi_d.i_q - \Phi_q.i_d \quad (2.7)$$

Para obter a tensão terminal em função dos parâmetros, das constantes de tempo (dados fornecidos pelo fabricante), das correntes estóricas e da tensão de campo, e assim poder realizar simulações dinâmicas do microgerador, são necessárias as seguintes aproximações:

1ª Aproximação: De acordo com a pratica usual (Mota, 1986) considerando-se que as retâncias mutuas em (p.u.) entre os enrolamento do campo e o amortecedor no eixo d são iguais as reatâncias mútuas entre os enrolamentos do estator e rotor do

eixo d. Ou seja $X_{mfd} = X_{md}$, substituindo esta aproximação nas equações (2.2)-(2.6), para eliminar as variáveis i_{fd} , i_{kd} e i_{kq} , tem-se:

$$\Phi_d = -X_d(p)i_d + \frac{X_{md}}{r_{fd}}G(p)V_r \quad (2.8)$$

$$\Phi_q = -X_q(p)i_q \quad (2.9)$$

onde as impedâncias operacionais são:

$$X_d(p) = X_d \frac{1 + p(T_{d4} + T_{d5}) + p^2 T_{d4} \cdot T_{d5}}{1 + p(T_{d1} + T_{d2}) + p^2 T_{d1} \cdot T_{d3}} \quad (2.10)$$

$$X_q(p) = X_q \frac{1 + pT_{q1}}{1 + pT_{q2}} \quad (2.11)$$

$$G(p) = \frac{1 + pT_{d7}}{1 + p(T_{d1} + T_{d2}) + p^2 T_{d1} \cdot T_{d3}} \quad (2.12)$$

$$T_{d1} = \frac{X_{fd}}{\omega_0 r_{fd}} \quad (2.13)$$

$$T_{d4} = \frac{1}{\omega_0 r_{fd}} \left(X_{fd} - \frac{X_{md}^2}{X_d} \right) \quad (2.14)$$

$$T_{d5} = \frac{1}{\omega_0 r_{kd}} \left(X_{kd} - \frac{X_{md}^2}{X_d} \right) \quad (2.15)$$

$$T_{d6} = \frac{1}{\omega_0 r_{kd}} X_{kd} + \frac{X_{md}^2 (2X_{md} - X_d - X_{fd})}{X_d X_{fd} - X_{md}^2} \quad (2.16)$$

$$T_{d3} = \frac{1}{\omega_0 r_{kd}} \left(X_{kd} - \frac{X_{md}^2}{X_{rd}} \right) \quad (2.17)$$

$$T_{d2} = \frac{X_{kd} - X_{md}}{\omega_0 r_{kd}} \quad (2.18)$$

$$T_{q1} = \frac{1}{\omega_0 r_{kq}} \left(X_{kq} - \frac{X_{mq}^2}{X_q} \right) \quad (2.19)$$

$$T_{q2} = \frac{X_{kq}}{\omega_0 r_{kq}} \quad (2.20)$$

$$T_{d7} = \frac{X_{kd}}{\omega_0 r_{kd}} \quad (2.21)$$

2ª Aproximação: Considerando-se que os valores relativos das resistências r_{rd} e r_{kd} dados nas equações (2.13)-(2.17) e (2.21), tem-se que o valor de T_{d1} é maior que T_{d2} e T_{d3} . Também como T_{d4} é maior que T_{d5} e T_{d6} , pode-se aproximar as impedâncias operacionais $X_d(p)$, $X_q(p)$ e $G(p)$ por:

$$X_d(p) = \frac{X_d(1 + pT'_{d1})(1 + pT''_{d1})}{(1 + pT'_{d0})(1 + pT''_{d0})} \quad (2.22)$$

$$G(p) = \frac{1 + pT_{kd}}{(1 + pT'_{d0})(1 + pT''_{d0})} \quad (2.23)$$

$$X_q(p) = \frac{X_q(1 + pT''_{q1})}{1 + pT''_{q0}} \quad (2.24)$$

onde o significado das constantes de tempo são detalhadas em Concordia (1957) e Adkins (1962), e definidas por:

$$T'_{d0} = T_{d1} \quad T''_{d0} = T_{d3} \quad T_{kd} = T_{d7}$$

$$\begin{aligned} T'_{da} &= T_{da4} & T''_{da} &= T_{da5} \\ T''_{qa} &= T_{qa1} & T''_{qa0} &= T_{qa2} \end{aligned}$$

2.1.1 - Considerações sobre a tensão base no rotor

Na maioria dos modelos de sistemas de excitação e reguladores de tensão, os parâmetros são dados em p.u. de uma base onde a tensão do campo é a tensão que produz a tensão nominal do gerador na linha do "air-gap". Este sistema chama-se sistema por unidade de tensão unitária (Mota, 1986).

$$V_{rd} = \frac{X_{md}}{r_{rd}} V_r \quad (2.25)$$

Substituindo-se (2.25) em (2.8), tem-se:

$$\Phi_d = -X_d(p) i_d + G(p) V_{rd} \quad (2.26)$$

$$\Phi_q = -X_q(p) i_q \quad (2.27)$$

3ª Aproximação: Expressando-se os fluxos concatenados estáticos (2.26) e (2.27) de forma conveniente para posteriores análises, substitui-se as impedâncias operacionais em função das retâncias síncronas, transitórias e subtransitórias dos eixos d e q definidas em Concordia (1957) e Adkins (1962) e das constantes A, B, G' e G'':

$$\begin{aligned} \Phi_d = & - \frac{A}{1 + pT'_{do}} i_d - \frac{B}{1 + pT''_{do}} i_d - X''_d i_d \\ & + \frac{G'}{1 + pT'_{do}} V_{rd} - \frac{G''}{1 + pT''_{do}} V_{rd} \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\Phi_d = - \frac{X_d - X''_d}{1 + pT''_{d0}} i_d - X''_d i_d \quad (2.29)$$

$$A \approx X_d - X'_d \quad (2.30)$$

$$B \approx X_d - X''_d \quad (2.31)$$

$$X''_d = X'_d \frac{T''_d}{T''_{d0}} \quad X_d = X_{md} + X_a \quad (2.32)$$

$$X'_d = X_d \frac{T'_d}{T'_{d0}} \quad X_d = X_{md} + X_a \quad (2.33)$$

$$X''_d = X_d \frac{T''_d}{T''_{d0}} \quad X'_d = X_d T'_d \frac{T'_d}{T'_{d0}} \quad (2.34)$$

$$G' = \frac{T'_{d0} - T_{kd}}{T'_{d0} - T''_{d0}} \quad (2.35)$$

$$G'' = \frac{T''_{d0} - T_{kd}}{T'_{d0} - T''_{d0}} \quad (2.36)$$

A aproximação introduzida em (2.30) e (2.31) introduz um erro da ordem de 1/2% e 5% respectivamente, onde o termo em B corresponde a um transitório de rápido decaimento, e introduz um pequeno erro nos resultados em estudos típicos de estabilidade transitória. Substituindo (2.30) e (2.31) em (2.26), tem-se:

$$\begin{aligned} \Phi_d \approx & \frac{X_d - X'_d}{1 + pT'_{d0}} i_d - \frac{X'_d - X''_d}{1 + pT''_{d0}} i_d - X''_d i_d \\ & + \frac{G'}{1 + pT'_{d0}} V_{rd} - \frac{G''}{1 + pT''_{d0}} V_{rd} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Pode-se eliminar p do denominador das equações dos fluxos concatenados estatóricos (2.29) e (2.37) com o auxílio das seguintes variáveis auxiliares V'_a , V''_a e V'''_a .

$$V'_a = \frac{G'}{1 + pT'_{a0}} \cdot V_{ra} - \frac{X_a - X'_a}{1 + pT'_{a0}} \cdot i_a \quad (2.38)$$

$$V''_a = \Phi_a + X''_a i_a \quad (2.39)$$

$$V'''_a = -(\Phi'_a + X'''_a \cdot i_a) \quad (2.40)$$

Onde para obter as derivadas das variáveis auxiliares tem-se as seguintes substituições em (2.29) e (2.37), isto é:

$$V'''_a = -\left(-\left(\frac{X_a - X''_a}{1 + pT''_{a0}}\right) i_a - X''_a \cdot i_a\right) + X''_a \cdot i_a \quad (2.41)$$

$$V''_a = \frac{X_a - X''_a}{1 + pT''_{a0}} i_a \quad (2.42)$$

$$V''_a + pV''_a \cdot T''_{a0} = (X_a - X''_a) i_a \quad (2.43)$$

$$pV''_a = \frac{1}{T''_{a0}} ((X_a - X''_a) (i_a - V''_a)) \quad (2.44)$$

De (2.38), tem-se:

$$(1 + pT'_{a0})V'_a = V_{ra} - (X_a - X'_a) i_a \quad (2.45)$$

$$pV'_a = \frac{1}{T'_{a0}} (G' V_{ra} - (X_a - X'_a) i_a - V'_a) \quad (2.46)$$

Substituindo-se (2.38) em (2.37) e (2.38) em (2.39), tem-se:

$$V''_a = (V'_a - \frac{X'_a - X''_a}{1 + pT''_{ao}} i_a - \frac{G''}{1 + pT''_{ao}} V_{ra} - X''_{aia}) + X''_{aia} \quad (2.47)$$

$$V''_a - V'_a = -(\frac{X'_a - X''_a}{1 + pT''_{ao}}) i_a - \frac{G'' V_{ra}}{1 + pT''_{ao}} \quad (2.48)$$

$$V''_a - V'_a + pT''_{ao} V''_a - pT''_{ao} V'_a = -(X'_a - X''_a) i_a - G'' V_{ra} \quad (2.49)$$

$$T''_{ao} pV''_a = -(X'_a - X''_a) i_a - G'' V_{ra} - V''_a + V'_a + pT''_{ao} V'_a \quad (2.50)$$

$$pV''_a = \frac{-1}{T''_{ao}} (- (X'_a - X''_a) i_a - G'' V_{ra} - V''_a + V'_a) + pV'_a \quad (2.51)$$

De (2.39), tem-se:

$$\Phi_a = V''_a - X''_{aia} \quad (2.52)$$

De (2.40), tem-se:

$$\Phi_a = X''_{aia} - V''_a \quad (2.53)$$

Substituindo-se (2.52), (2.53) em (2.7), obtem-se:

$$T_{e1} = V''_{aia} + V''_{aia} + (X''_a - X''_a) i_a i_a \quad (2.54)$$

Substituindo-se (2.2) e (2.5) em (2.1), tem-se:

$$V_d = -r_a i_a + \frac{P}{w_o} \Phi_d - w \Phi_a \quad (2.55)$$

$$V_a = -r_a i_a + \frac{P}{w_o} \Phi_a + w \Phi_d \quad (2.56)$$

As equações (2,39) ,(2.40), (2.44), (2.46), (2,51), (2.54), (2.55),(2.56) são equivalentes a equação (2.1) com erro de aproximadamente 5%, erro que é introduzido por conta das aproximações no cálculo das constantes de tempo.

Derivando-se as equações (2.52) e (2.53), tem-se:

$$p\dot{\Phi}_d = p(V''_d - X''_{d1d}) \quad (2.57)$$

$$p\dot{\Phi}_q = -p(V''_d + X''_{q1q}) \quad (2.58)$$

multiplicando-se as equações (2.57) e (2.58) por w, tem-se:

$$w\dot{\Phi}_d = w(V''_d - X''_d) i_d \quad (2.59)$$

$$w\dot{\Phi}_q = w(V''_d + X''_q) i_q \quad (2.60)$$

4ª Aproximação: Para eliminar o cálculo das equações diferenciais de i_d e i_q em (2.57) e (2.58) e a componente da velocidade relativa w nas correntes estatóricas i_d e i_q em (2.59) e (2.60) tem-se:

Considerando-se os termos $p i_d X''_d$ e $p i_q X''_q$ de (2.57) e (2.58) são muito pequenos (Hammons,1971), pode-se aproximar a:

$$p\dot{\Phi}_d \approx pV''_d \quad (2.61)$$

$$p\dot{\Phi}_q \approx pV''_d \quad (2.62)$$

Considerando-se $w = 1$ nos termos $wX''_d i_d$ e $wX''_q i_q$ de (2.59) e (2.60), isto é $w_d = w_R$ (Hammons,1971), pode-se aproximar a:

$$w\dot{\Phi}_d \approx V''_d - X''_{d1d} \quad (2.63)$$

$$w\dot{\Phi}_q \approx -wV''_d - X''_{q1q} \quad (2.64)$$

Substituindo-se as equações (2.61), (2.62), (2.63) e (2.64) nas equações (2.55) e (2.56), tem-se:

$$V_d = -r_{a1}i_d + \frac{P}{\omega_0} V''_a + wV''_a + X''_{a1}i_d \quad (2.65)$$

$$V_q = -r_{a1}i_q - \frac{P}{\omega_0} V''_a + wV''_a - X''_{a1}i_q \quad (2.66)$$

As equações (2.44), (2.46), (2.51) (2.54), (2.65) e (2.66) são as equações usadas para representar as máquinas síncronas em simulações digitais, similares aquelas usadas por Kozlowski (1963) e Hammons (1971).

5ª Aproximação: Considerando-se $w = 1$ em (2.65) e (2.66), isto implica considerar que a velocidade rotórica permanece constante e igual a velocidade síncrona, isto é, ângulo de carga constante, esta afirmação é válida para estudos onde a variação de carga nos terminais do microgerador são pequenas comparando-se com a potência nominal do microgerador. Esta aproximação é similar àquela usada por Mota (1986), assim as equações (4.66) e (4.67), tornam-se:

$$V_d = -r_{a1}i_d + \frac{P}{\omega_0} V''_a + V''_a + X''_{a1}i_d \quad (2.67)$$

$$V_q = -r_{a1}i_q - \frac{P}{\omega_0} V''_a + V''_a - X''_{a1}i_q \quad (2.68)$$

A tensão terminal em (p.u) e dada por:

$$V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (2.69)$$

2.2 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO MICROGERADOR SÍNCRONO

Aplicando transformada de Laplace as equações dos fluxos concatenados (2.26) e (2.27) tem-se:

$$\Phi_d = - X_d(S)(i_d(S)+i_d(0)) + G(S)(V_{fd}(S)+\Phi_{fd}(0)) \quad (2.70)$$

$$\Phi_q = - X_q(S)((i_q(S)+i_q(0))) \quad (2.71)$$

Considerando-se que o microgerador está em vazio tem-se:

$$i_d(S) = i_q(S) = \Phi_{fd} = 0 \quad (2.72)$$

$$G(S) = \frac{1 + ST_{kd}}{(1 + ST'_{do})(1 + ST''_{do})} \quad (2.73)$$

$$\Phi_d(S) = \frac{1 + ST_{kd}}{(1 + ST'_{do})(1 + ST''_{do})} V_{fd}(S) \quad (2.74)$$

$$\Phi_q(S) = 0 \quad (2.75)$$

Aplicando-se transformada de Laplace as equações, (2.55) e (2.56) e considerando-se o microgerador em regime permanente, isto é: velocidade síncrona relativa e ângulo de carga constante, tem-se:

$$V_d(S) = \Phi_d(S) \quad (2.76)$$

$$V_q(S) = 0 \quad (2.77)$$

Substituindo-se (2.76) e (2.77) em (2.69) tem-se:

$$V_t(S) = \frac{1 + ST_{kd}}{(1 + ST'_{do})(1 + ST''_{do})} V_{fd}(S) \quad (2.78)$$

$$G_M(S) = \frac{V_t(S)}{V_{fd}(S)} = \frac{1 + ST_{kd}}{(1 + ST'_{do})(1 + ST''_{do})} \quad (2.79)$$

onde $G_M(S)$ é a função de transferência da tensão terminal e tensão de campo do microgerador síncrono considerando o efeito dos enrolamentos amortecedores.

Para efeitos de projeto do regulador de tensão e considerando-se que a constante de tempo T_{kd} do microgerador é muito pequena em relação as constantes T'_{do} e T''_{do} , (cf., tabela 3.2) pode-se aproximar à seguinte função:

$$G'_{MG}(S) = \frac{V_t(S)}{V_{fd}(S)} = \frac{1}{(1 + ST'_{do})(1 + ST''_{do})} \quad (2.80)$$

onde $G'_{MG}(S)$ é a função de transferência aproximada da tensão terminal e tensão de campo do microgerador síncrono, considerando-se o efeito dos enrolamentos amortecedores.

Analisando-se (2.80) e desprezando-se os efeitos dos enrolamentos amortecedores, tem-se:

$$G_{MG}(S) = \frac{V_t(S)}{V_{fd}(S)} = \frac{1}{1 + ST'_{do}} \quad (2.81)$$

onde $G_{MG}(S)$ é a função de transferência da tensão terminal e tensão de campo do microgerador síncrono, sem considerar os efeitos dos enrolamentos amortecedores.

2.3 - SIMULAÇÃO DIGITAL DO MICROGERADOR

A simulação dinâmica do microgerador é representada através de dois modelos matemáticos, desenvolvidos utilizando-se 4 aproximações para o modelo 1 e 5 aproximações para o modelo 2.

O modelo 1 é representado por cinco equações diferenciais (2.4), (2.5), (2.44), (2.46), (2.51), (resolvidas método de integração de Runge Kutta de quarta ordem) e três equações algébricas (2.65), (2.66) e (2.69).

O modelo 2 é menos preciso em relação ao modelo 1 pelo fato que considera a velocidade síncrona relativa ($w = 1$), válido para pequenas variações de carga, representado pelas mesmas equações diferenciais do modelo 1 e pelas equações algébricas (2.67), (2.68) e (2.69).

As correntes i_d e i_q são obtidas através das transformações de Park, (cf., (2.82), (2.83)) onde as correntes trifásicas estáticas são impostas ao microgerador através, de simulações de cargas.

$$I_d = \frac{2}{3} [I_a \cos\theta + I_b \cos(\theta - 2\pi/3) + I_c \cos(\theta + 2\pi/3)] \quad (2.82)$$

$$I_q = \frac{2}{3} [-I_a \sin\theta - I_b \sin(\theta - 2\pi/3) - I_c \sin(\theta + 2\pi/3)] \quad (2.83)$$

onde: $I_a = I_m \sin\omega t$, $I_b = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$, $I_c = I_m \sin(\omega t + 2\pi/3)$
 $\theta =$ ângulo de carga que define a posição do rotor, $\theta = \omega r t + \theta_0$
 $\theta_0 =$ ângulo inicial

A tensão de excitação do microgerador é obtida através de uma ponte trifásica simétrica controlada por um regulador de tensão PI, que a seguir é detalhado.

2.4 - MODELO PARA SIMULAÇÃO DINÂMICA DO REGULADOR DE TENSÃO E SISTEMA DE EXCITAÇÃO

O controle da tensão de um gerador síncrono é obtido através da tensão de excitação V_{ra} . A figura II.2 mostra o modelo desenvolvido para representar o controle da tensão terminal do microgerador através de um sistema de excitação estático.

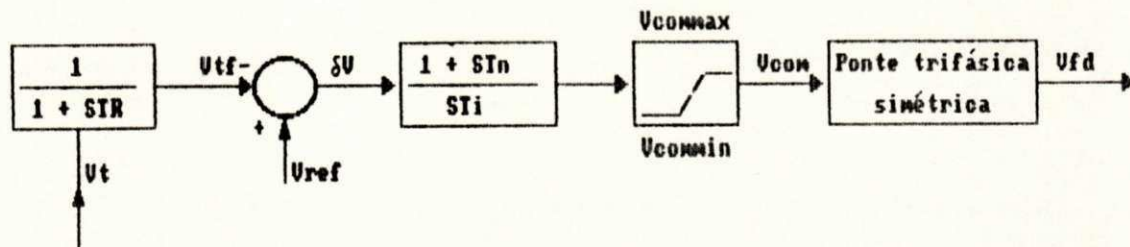


Fig. II.2 - Diagrama de blocos do sistema de controle da tensão terminal do microgerador.

O modelo do regulador proporcional integral é definido pelas seguintes equações.

$$\delta V(t) = V_{ref}(t) - V_{tf}(t) \quad (2.84)$$

$$V_{com}(t) = \frac{1}{T_i} \int \delta V(t) dt + \frac{T_n}{T_i} \delta V(t) \quad (2.85)$$

onde: $v_{ref}(t)$ é a tensão de referência, $V_{tf}(t)$ é a tensão obtida do filtro de medição, T_n e T_i são os parâmetros do regulador.

$V_{com}(t)$ é a tensão de saída do regulador.

Para simular o comportamento dinâmico do regulador podem ser usados métodos numéricos de integração ou simplesmente um integrador de primeira ordem, isto é:

$$V_{com}(t) = \sum_{i=0}^n \frac{1}{T_1} \delta V(t) \delta t + \frac{T_N}{T_1} \delta V(t) \quad (2.86)$$

onde: δt é o incremento de tempo para cada interação. (passo de integração)

A tensão máxima do regulador é:

$$V_{commax} = 5.22 \quad (2.87)$$

O modelo do filtro de medição é simulado pela integração de de uma equação de primeira ordem utilizando o método de Runge Kutta de quarta ordem, de acordo com o modelo sugerido pela IEEE Committee Report, (1968) (cf., fig II.3 e item 4.3), onde:

$$T_F = .038s \quad (2.88)$$

O modelo do sistema de excitação estático é simulado por um programa que simula o funcionamento de uma ponte trifásica simétrica controlada e que possui as mesmas características dinâmicas da ponte trifásica simétrica que apresenta-se no item 3.5.1 cuja tensão de saída é da forma:

$$V_{fd} = E_{d0} \cos \omega t \quad (2.89)$$

onde: $E_{d0} = 3.5 = V_{fdmax} = \text{Tensão máxima de excitação} / (\text{tensão de excitação em vazio}) (X_{md} \text{ em p.u.})$

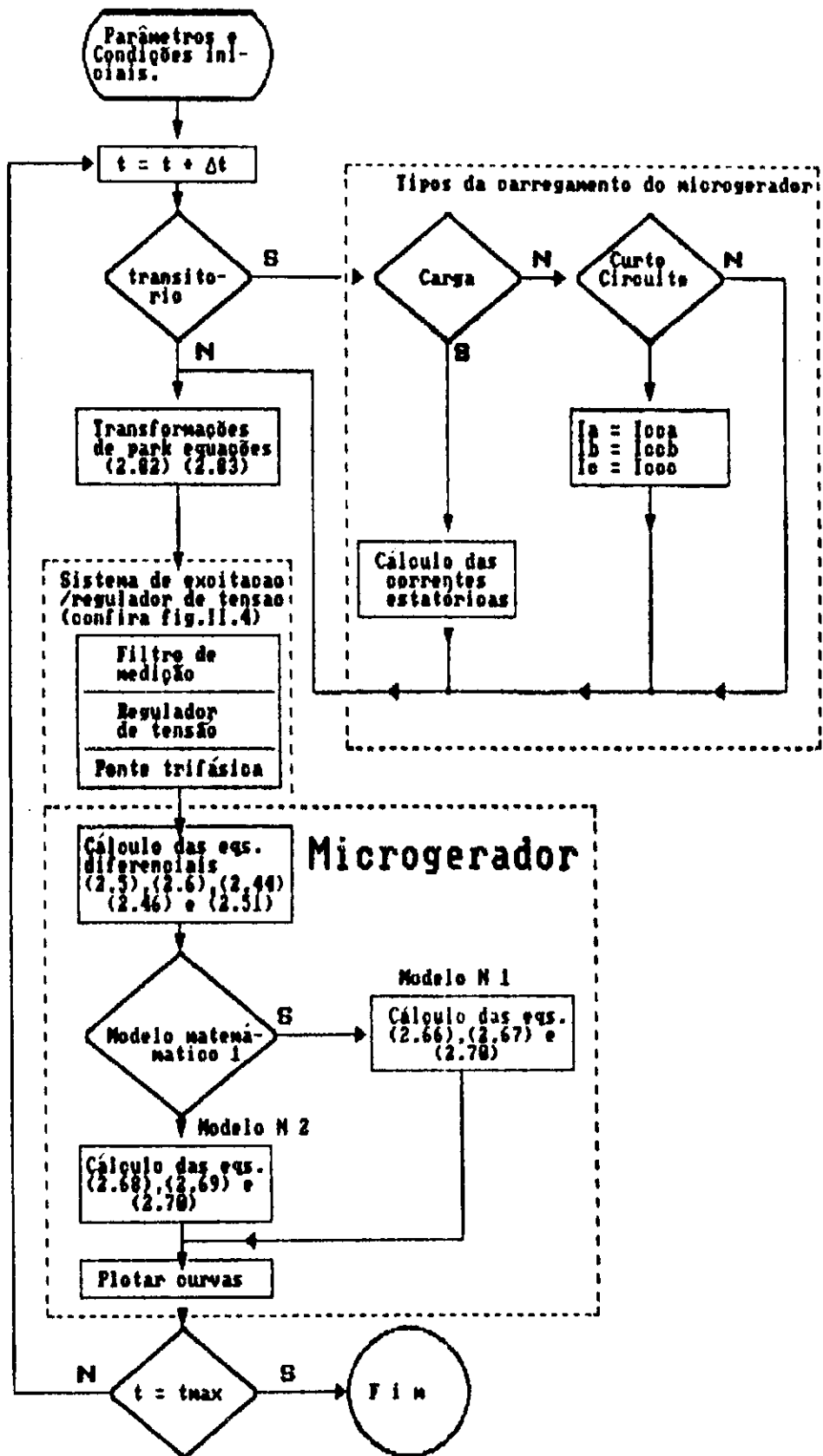


Fig. 11-3 Fluxograma do programa do microgerador síncrono 3kva

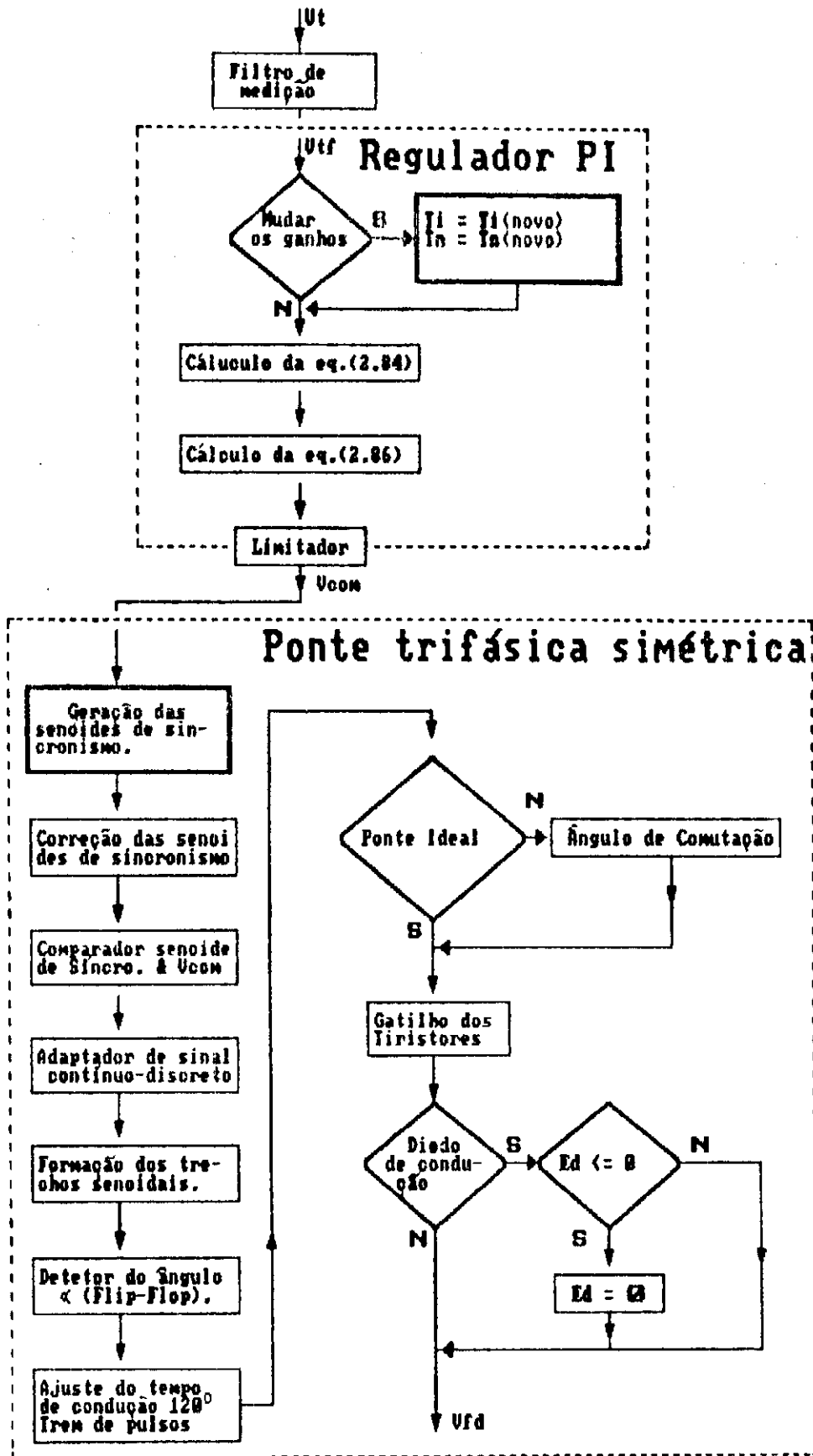


Figura II.4 Fluxograma do programa do sistema de excitação e regulador de tensão

A figura II.3 e II.4 mostram os fluxogramas dos programas do microgerador e do sistema de excitação estático e regulador de tensão.

2.5 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MICROGERADOR COM REGULAÇÃO DE TENSÃO

As figura II.5 mostra os transitórios de tensão (terminal, campo e controle) utilizando o modelo 2, para representar o microgerador, que excitado através de uma ponte trifásica comandada por um regulador proporcional integral com parâmetros T_N e T_I , calculados utilizando os criterios de compensação de polo dominante e amortecimento ótimo, (cf., item 4.7), isto é:

$$T_N = T'_{do} = .55 \quad T_I = 2T'_{PF}K_P = .07 \quad (2.90)$$

onde: $T'_{PF} = T_F + T_P + T''_{do} = .0515$ $K_P = .67$ $T_F = .038$ $T_P = .0027$
 $T''_{do} = .0108$

Nota-se que as variáveis: tensão terminal V_t (p.u.), tensão de controle V_{com} e a tensão de campo V_{ra} (p.u.) mostram a dinâmica do sistema (microgerador com sistema de excitação e regulador de tensão), para um transitório originado pela entrada e saída de uma carga ativa de 1500 Watts, respectivamente.

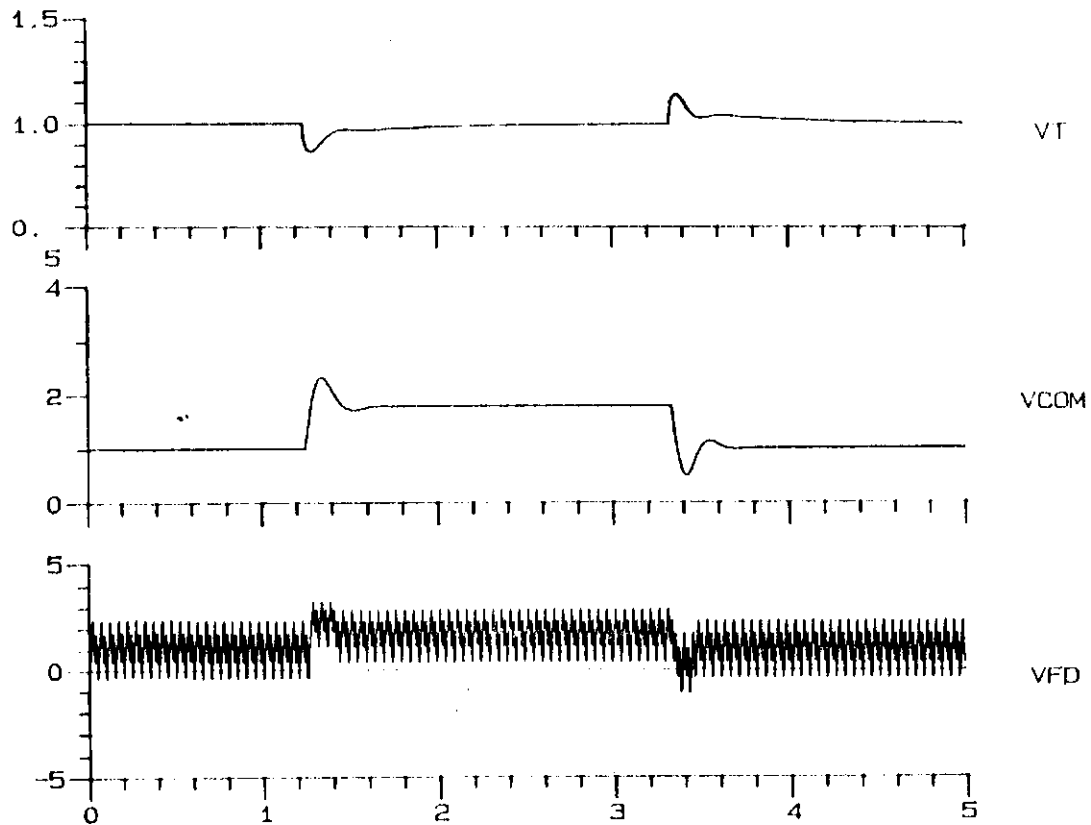


Figura II.5 - Transitório da tensão terminal, tensão de controle e tensão de excitação do microgerador, originado pela entrada e saída de carga.

2.6 - CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram desenvolvidos dois modelos matemáticos com graus de complexidade diferentes, a partir das equações fundamentais para máquinas síncronas, que foram utilizados na simulação dinâmica do microgerador síncrono de 3kva, sistema de excitação e regulador de tensão proporcional integral, cujos modelos para simulação constituem uma ferramenta importante no estudo de estabilidade dinâmica em sistemas de potência.

CAPÍTULO 3

MICROGERADOR SÍNCRONO E SISTEMA DE EXCITAÇÃO

3.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Os estudos teóricos de problemas associados ao controle de sistemas de potência, especificamente aqueles sistemas que estão submetidos a condições transitórias, são usualmente simulados através de modelos aproximados em computadores digitais. Embora os resultados obtidos destes estudos sejam muito importantes, existe um constante interesse em desenvolver laboratórios de microgeração no Brasil e em outros países para ensino e pesquisa.

3.2 - LABORATÓRIO DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A crescente demanda de energia elétrica requer a expansão dos sistemas de geração de energia elétrica, e conseqüentemente a complexidade da operação de grandes sistemas. Para realizar melhores estudos dos sistemas de geração, estão sendo utilizados laboratórios de microgeração para simular o comportamento dos sistemas sob diferentes condições de operação, e com isso obter uma visão mais global e precisa do sistema de geração.

Tais laboratórios são compostos de um microgerador síncrono acoplado a um motor CC (micro turbinas).

A história dos microgeradores para estudos de sistemas de potência tem início no início da década de 50, com o engenheiro

francês Robert, e na URSS com Venikov e Kostenko. Estes modelos foram amplamente utilizados por Adkins na Inglaterra, onde a maioria dos laboratórios passaram pelo problema da potência muito alta dos microgeradores (10-100KVA). No início dos anos 70, Hammons projetou e a Mawdsley's Limited fabricou o microgerador trifásico (3KVA) para representar geradores de até mil vezes a potência nominal do microgerador.

As Universidades da Inglaterra, EUA, Canadá, Índia e outras universidades adquiriram o microgerador, como também algumas universidades Brasileiras, entre elas a Universidade Federal da Paraíba.

3.3 - CARACTERÍSTICAS DO MICROGERADOR

O microgerador de pólos salientes ou cilíndricos foi projetado visando reduzir as resistências por unidade dos enrolamentos, como também as geometrias das ranhuras e as dimensões do entreferro, para obter as reatâncias desejadas. A potência de 3KVA foi escolhida para ser a potência nominal do microgerador.

Os parâmetros dos grandes geradores síncronos que são representados pelo microgerador (modelo reduzido) são:

- a) Constantes de tempo dos eixos d e q do estator.
- b) Reatâncias dos eixos d e q
- c) Características de magnetização.
- d) Reatâncias de dispersão e características de saturação dos eixos d e q.

- e) Perdas do núcleo,
- f) Constantes de tempo do estator e do rotor.
- g) Perdas por atrito.
- h) Inércia.
- i) Resistência do estator.

A resistência dos enrolamentos do rotor, bem como a constante de tempo T'_{ao} (constante de tempo transitório de circuito aberto do eixo d) não foram simuladas diretamente, porque o rotor do microgerador não tem espaço físico para alocar cabos de cobre de maior diâmetro e com isto diminuir a resistência no enrolamento, bem como aumentar a indutância. Com isto a constante de tempo T'_{ao} do micro-gerador, que é da ordem de 0.5s, deve ser aumentada mediante reguladores de constante de tempo e enrolamentos auxiliares alocados no rotor (Hammons, 1971).

3.3.1 - Rotor

O rotor é do tipo cilíndrico de 4 polos e está formado por 3 enrolamentos, dois de amortecimento, nos eixos d e q, um de campo no eixo δ , e três enrolamentos auxiliares (utilizado para aumentar a constante de tempo T'_{ao}), corrente máxima 4.4A, tensão máxima 16V.

3.3.2 - Estator

Tensão 220/127V, 60 Hertz, 1800 RPM, 3 fases, 3KVA, corrente máxima 7.9A, 4 polos.

3.3.3 - Valores por unidade

O sistema por unidade adaptado é $1/\sqrt{2}$ vezes X_{ma} , sistema base definido por Rankin (1945) onde as grandezas são medidas em RMS em vez de valores de pico da corrente e tensão.

3.3.4 - Impedância

A Tabela 3.1 mostra as impedâncias por unidade do microgerador fornecidas pelo fabricante e obtidas pelo método de Adkins (1957).

TABELA 3.1

| DESCRIÇÃO DE REATÂNCIAS | SÍMBOLO | (Pu) |
|------------------------------------|----------|--------|
| Resistência do estator | r_a | 0.0053 |
| Resistência de campo, eixo d | r_{fd} | 0.0095 |
| Resistência de amortecedor, eixo d | r_{kd} | 0.067 |
| Resistência de amortecedor, eixo q | r_{kq} | 0.067 |
| Reatância de dispersão de armadura | X_a | 0.121 |
| Reatância própria de campo, eixo d | X_{fd} | 0.166 |
| Reatância do amortecedor, eixo d | X_{kd} | 0.122 |
| Reatância do amortecedor, eixo q | X_{kq} | 0.122 |
| Reatância de magnetização, eixo d | X_{md} | 1.81 |
| Reatância de magnetização, eixo q | X_{mq} | 1.71 |

3.3.5 - Constantes de tempo

A Tabela 3.2 mostra as constantes de tempo em segundos que são fornecidas pelo fabricante. obtidas seguindo o procedimento de teste para máquinas síncronas sugerido pela IEEE (1965).

TABELA 3.2

| DESCRIÇÃO DE CONSTANTE DE TEMPO DO MICROGERADOR | SÍMBOLO | (pu) |
|---|------------|---------|
| Constante de tempo de circuito aberto transitória, eixo d | T'_{do} | 0.5517 |
| Constante de tempo de curto circuito transitória, eixo d | T'_d | 0.078 |
| Constante de tempo de circuito aberto sub-transitória, eixo d | T''_{do} | 0.0108 |
| Constante de tempo de curto-circuito sub-transitória, eixo d | T''_d | 0.0075 |
| Constante de tempo de circuito aberto sub-transitória, eixo q | T''_{qo} | 0.0726 |
| Constante de tempo de curto-circuito sub-transitória, eixo q | T''_q | 0.00925 |
| Constante de tempo do circuito amortecedor, eixo d ($T_{kd} = X_{kd} / r_{kd}$) | T_{kd} | 0.00484 |

3.4 - MOTOR CC (Microturbina)

A microturbina é simulada por um motor CC com excitação independente que está diretamente acoplado ao microgerador e no lado oposto são acoplados volantes de aço para a simulação da inércia. A Tabela 3.3 mostra as características do motor CC.

TABELA 3.3

| MOTOR CC DE EXCITAÇÃO INDEPENDENTE | UNIDADE | VALORES NOMINAIS |
|------------------------------------|---------|------------------|
| Corrente de excitação | A | 4.75 |
| Tensão de excitação | V | 40 |
| Corrente de armadura | A | 30 |
| Tensão de armadura | V | 230 |
| Número de polos em série | | 4 |
| Velocidade | RPM | 1800 |
| Potência | KW | 5.5 |

3.5 - EXCITATRIZ DO MICROGERADOR

A excitatriz do microgerador é do tipo estático, cuja função é fornecer corrente contínua ao campo mediante escovas. Na sequência, é apresentado um projeto específico de uma ponte trifásica simétrica, a ser utilizada como excitatriz do microgerador.

3.5.1 - Projeto de uma ponte trifásica simétrica

As pontes trifásicas controladas vem sendo amplamente usadas nos sistemas de excitação estáticos, passaram a ser usadas a partir da década dos anos 60 (Jardim, 1986).

3.5.2 - Condições ideais para funcionamento da ponte trifásica simétrica

Para o estudo do funcionamento ideal da ponte em regime permanente, tem-se as seguintes suposições: (Fig.III.1(a))

- Indutância da carga "L" é infinita. Isto implica que a corrente é contínua.

- Indutância "L_c" do circuito de comutação é desprezível L_c ≈ 0, o que implica que a corrente pode ser comutada instantaneamente entre os tiristores. Logo, o fenômeno da comutação é desprezível.

3.5.3 - Funcionamento

A figura III.1 (b), mostra que a tensão contínua de saída da ponte "E_{dα}" que é obtida da diferença das tensões de fase,

$$E_{d\alpha} = E_{d1} - E_{d2} \quad (3.1)$$

onde E_{d1} é composta pelos trechos senoidais das tensões de fase V_a, V_b, V_c em sincronismo de condução com os tiristores T₁, T₂, T₃. A tensão E_{d2} é composta pelos trechos senoidais das tensões de fase V_a, V_b, V_c em sincronismo de condução dos tiristores, T₂, T₄, T₅.

A tensão de pico E_{dα} corresponde aos trechos senoidais de um sistema hexafásico de amplitude igual a √2V_L, onde V_L é a tensão eficaz de linha. A tensão E_d é obtida do gatilhamento sincronizado dos tiristores, onde a duração de condução de cada tiristor é de 120° graus elétricos, na seguinte sequência:

$$\begin{aligned}
T_1 \text{ e } T_6 \text{ conduzindo,} & \quad E_{d\alpha} = V_a - V_b = V_{ab} \\
T_1 \text{ e } T_5 \text{ conduzindo,} & \quad E_{d\alpha} = V_a - V_c = V_{ac} \\
T_2 \text{ e } T_6 \text{ conduzindo,} & \quad E_{d\alpha} = V_b - V_c = V_{bc} \\
T_2 \text{ e } T_4 \text{ conduzindo,} & \quad E_{d\alpha} = V_b - V_a = V_{ba} \\
T_3 \text{ e } T_4 \text{ conduzindo,} & \quad E_{d\alpha} = V_c - V_a = V_{ca} \\
T_3 \text{ e } T_5 \text{ conduzindo,} & \quad E_{d\alpha} = V_c - V_b = V_{cb}
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

O ângulo de condução "α" é medido a partir das intersecções no semiciclo positivo das senoides hexafásicas.

3.5.4 - Cálculo de tensão contínua ideal "E_{dα}"

O valor médio da tensão contínua ideal E_{dα} depende do valor do ângulo de condução "α".

$$E_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} \sqrt{2} \int_{-2\pi/3 + \alpha}^{\pi/3 + \alpha} V_L \cos(\omega t) dt
\tag{3.3}$$

$$E_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_L \cos(\alpha) = 1.35 V_L \cos(\alpha)
\tag{3.4}$$

A tensão contínua máxima é para α = 0

$$E_{d0} = 1.35 V_L
\tag{3.5}$$

logo, pode-se escrever a seguinte relação:

$$E_{d\alpha} = E_{d0} \cos\alpha
\tag{3.6}$$

$$\frac{E_{d\alpha}}{E_{d0}} = \cos\alpha
\tag{3.7}$$

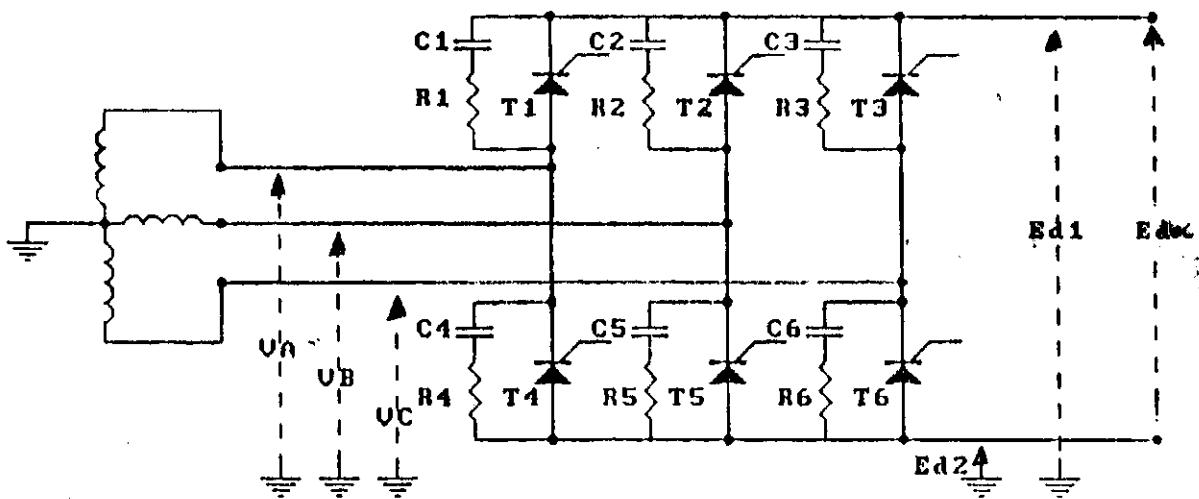


Figura III.1 (a) - Ponte trifásica simétrica controlada

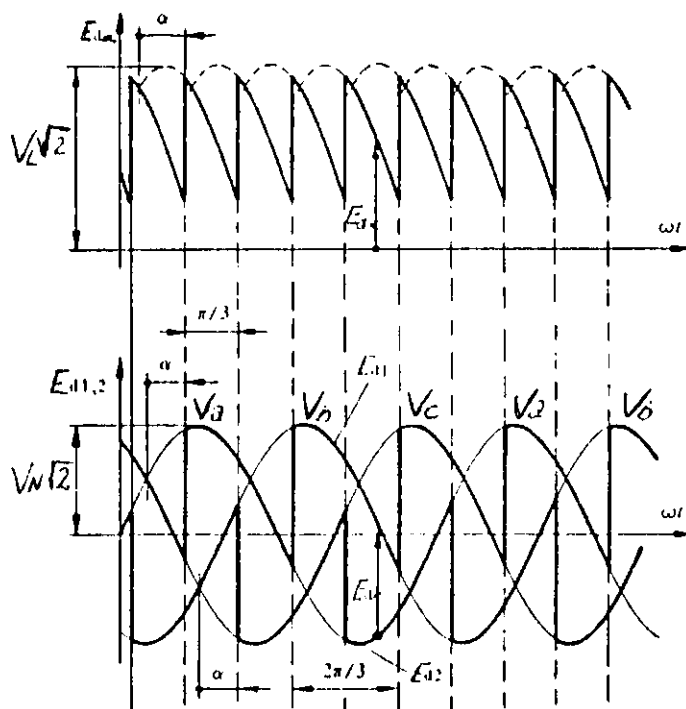


Figura II.1(b) Forma de onda da tensão $E_{d\alpha}$

3.5.5 - Função de transferência da ponte trifásica simétrica

Assumindo-se que o circuito de gatilhamento controla 6 ângulos de gatilhamentos proveniente de um sistema de alimentação de 60Hz, segundo Wooldridge (1967) o atraso que é introduzido é aproximadamente,

$$T_p = \frac{1}{6 \times 60\text{Hz}} = 0.0027 \text{ s} \quad (3.8)$$

onde este atraso pode ser aproximado por uma função de primeira ordem (Büller, (1979), isto é:

$$e^{-ST_p} = \frac{1}{1 + ST_p} \quad (3.9)$$

O ganho da ponte é obtido da relação da tensão de saída da ponte e a tensão de controle máxima V_{commax} , isto é:

$$K_p = \frac{E_{d0}}{V_{commax}} \quad (3.10)$$

Substituindo-se (3.10) em (3.5), tem-se:

$$K_p = \frac{1.35 V_L}{V_{commax}} \quad (3.11)$$

Para efeitos específicos deste projeto, escolhe-se $V_L = V_{commax}$, e assim obtemos a função transferência da ponte $G_p(S)$

$$K_p = 1.35 \quad (3.12)$$

$$G_p(S) = \frac{V_{com}(S)}{E_d(S)} = \frac{K_p}{1 + T_p S} \quad (3.13)$$

3.5.6 - Característica ideal da ponte trifásica simétrica

A característica ideal da ponte trifásica simétrica é obtida de (3.7) como mostra a figura III.2.

3.5.7 - Condições reais para funcionamento da ponte

Para os estudos de funcionamento real de uma ponte, tem-se as seguintes suposições:

- A indutância da carga "L" não é infinita, $L = L_{ra}$, onde L_{ra} é a indutância do circuito do campo do microgerador.
- A indutância do circuito de comutação " L_c " não é mais desprezível, $L_c = L_r$, onde L_r é a indutância do transformador.

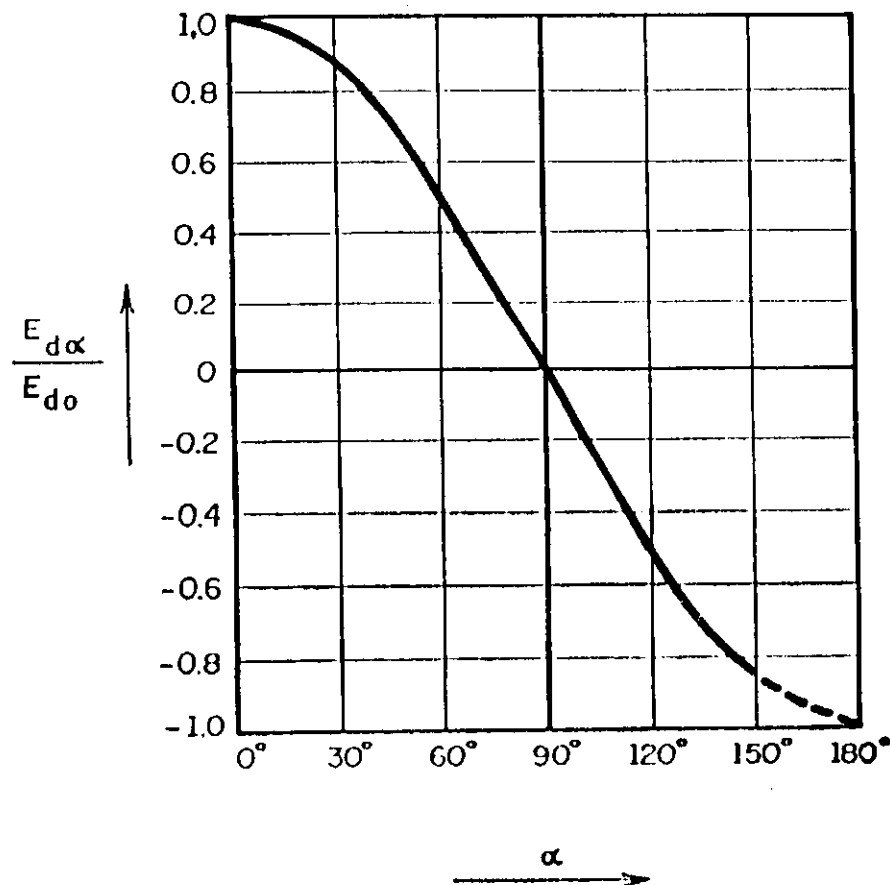


Figura III.2 - característica ideal da ponte

3.5.8 - Ângulo de comutação

Bülher (1979) faz um estudo sobre o ângulo de comutação de onde obtem-se as seguintes conclusões: O ângulo de comutação depende do ângulo de gatilho "α", da corrente contínua, das indutâncias e da tensão da fonte. Este ângulo de comutação introduz um pequeno atraso que é função do valor deste ângulo.

3.5.9 - Escolha do SCR

Os SCR's utilizados na implementação da ponte trifásica tem características nominais de operação superiores as condições reais de funcionamento da ponte, entre tanto: é apresentado na seqüência um procedimento para escolha de SCR's compatíveis com a operação real da ponte.

A especificação adequada do tiristor deve levar em conta o valor médio e o valor RMS da corrente que por ele circula e tensão reversa máxima.

3.5.9.1 - Cálculo da corrente do tiristor

Cada SCR conduz durante um terço do ciclo de 60 Hz, isto é, 120° elétricos, e a corrente máxima do campo para máxima carga do microgerador é de $I_{rmax} = 4.4$ A Logo, o valor médio da corrente máxima que circula em cada tiristor será:

$$I_{rmed} = \frac{I_r}{3} = \frac{4.4}{3} = 1.47 \text{ A} \quad (3.14)$$

A corrente RMS máxima que circula em cada tiristor é:

$$I_{\text{TRMS}} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} I_{\text{rmax}}^2 dt \right]^{1/2} = \frac{I_r}{\sqrt{3}} = 2.54 \quad (3.15)$$

3.5.9.2 - Cálculo das tensões reversa máxima do tiristor

A tensão máxima contínua V_{rmax} é $V_{\text{rmax}} = 16 \text{ V}$

A tensão reversa máxima que pode ser aplicada a cada tiristor é dada por:

$$V_{\text{Tmax}} = \sqrt{2} V_L = \sqrt{3} \sqrt{2} V_N \quad (3.16)$$

de (3.5), obtém-se a tensão de linha:

$$V_L = \frac{E_{\text{do}}}{1.35} \quad (3.17)$$

$$E_{\text{do}} = E_{\text{rmax}} = 16\text{V} \quad \text{logo:} \quad (3.18)$$

$$V_L = 11.84\text{V} \quad (3.19)$$

$$V_{\text{Tmax}} = \sqrt{2} 11.84 = 16.75\text{V} \quad (3.20)$$

3.5.9.3 - Cálculo do dissipador

O calor gerado entre a junção e o encapsulamento do tiristor, é absorvido por dissipadores que possuem uma resistência térmica que possibilita a evacuação calorífica do tiristor que é dada em graus Celsius por watts ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).

A quantidade de calor que deseja-se dissipar será obtida pela diferença entre a temperatura de junção e a temperatura ambiente. É possível fazer uma analogia elétrica para o dimensio-

namento do dissipador, onde a fonte de tensão é representada pela diferença de temperaturas, a corrente que circula é representada pela potência dissipada pelo tiristor e a resistência ôhmica é representada pela resistência térmica, como mostra a figura III.3

onde: T_J = Temperatura de Junção do Tiristor (fornecido pelo fabricante)

T_A = Temperatura Ambiente

θ_{JC} = Resistência Térmica entre a junção e o encapsulamento (fornecido pelo fabricante)

θ_{CS} = Resistência Térmica entre o encapsulamento e o dissipador (fornecido pelo fabricante).

θ_{SA} = Resistência Térmica entre o dissipador e o ambiente.

3.5.9.4 - Cálculos térmicos

Empregando-se a analogia com o circuito elétrico, calcula-se o valor de θ_{SA} ($^{\circ}C/W$) do dissipador da seguinte equação:

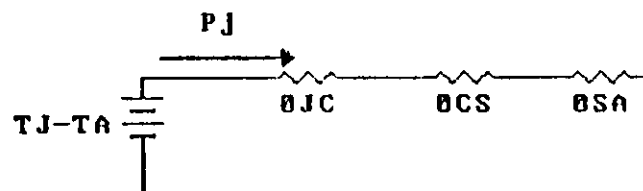


Fig. III.3 Circuito térmico equivalente do dissipador

$$T_J - T_A = \theta_{JC} P_J + \theta_{CS} P_J + \theta_{SA} P_J \quad (3.21)$$

onde P_J é a potência dissipada no tiristor (dada pelo fabricante)

Da equação (3.21), obtém-se:

$$\theta_{SA} = \frac{T_J - T_A}{P_J} - \theta_{JC} - \theta_{CS} \quad (3.22)$$

Resolvendo-se a equação (3.22), obtém-se a resistência térmica necessária para a escolha do dissipador.

3.5.10 - Fusíveis para tiristores

Para a proteção rápida do tiristor tempo contra altas correntes de curto circuito causadas por falhas internas ou externas, são usados fusíveis, também chamados de "fuselinks" (Howe, 1980), são conectados em série com os tiristores para oferecer a melhor proteção.

O dimensionamento do fusível deve levar em conta o valor de I^2t fornecido pelo fabricante, ou seja, o fusível escolhido deve ter o valor I^2t inferior ao do tiristor, de forma a atuar antes que o tiristor seja danificado, protegendo-o.

O preço dos tiristores para correntes menores de 10A é relativamente insignificante em relação aos preços dos fusíveis, (Howe, 1980). Conclui-se que o uso do disjuntor é suficiente para a proteção da ponte e do campo do microgerador, dispensando assim o uso dos fusíveis para este projeto.

3.5.11 - Circuito "snubber"

A especificação do circuito "snubber" é feita com base nas informações fornecidas pelo fabricante dos tiristores.

3.5.12 - Transformadores de sincronismo

O sincronismo de disparo dos 6 tiristores, necessário para o gatilhamento dos tiristores nos instantes adequados é obtido das tensões de fase que alimentam a ponte através dos transformadores de sincronismo. Estes transformadores geram um sistema hexafásico de tensões de linha, como mostra a figura III.4.

3.5.13 - Circuito de gatilho de tiristores

Para se obter de forma simples uma relação linear entre a tensão de controle e o valor médio da tensão de saída da ponte, (cf. equação 3.6 e figura III.2) utiliza-se sinais tipo senoidais obtidos dos transformadores de sincronismo. É comumente utilizada uma tensão tipo rampa que opera na região de linearidade da senoide para se comparar com o sinal de controle. Entretanto, não se tem uma relação linear entre a tensão de controle e o valor médio da tensão de saída da ponte.

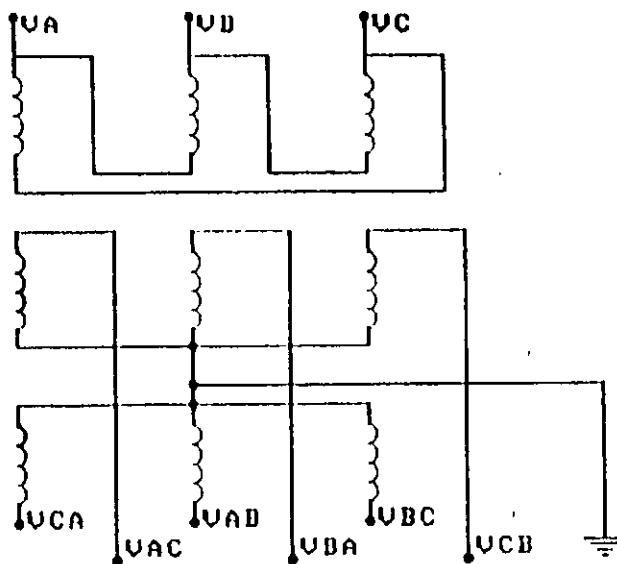


fig. III.4 - Transformador de sincronismo da ponte

3.5.13.1- Obtenção das senóides de sincronismo

Para se obter 6 tensões de fase senoidais simples (V_a , V_b , V_c , $-V_a$, $-V_b$, $-V_c$), necessárias para gatilhamento sincronizado dos tiristores utiliza-se divisores de tensão nas seis tensões de linha (V_{ab} , $-V_{ab}$, V_{bc} , $-V_{bc}$, V_{ca} , $-V_{ca}$) provenientes do secundário dos transformadores de sincronismo.

Por exemplo, para se obter a senoide simples $-V_b$ é utilizado o divisor de tensão entre as tensões V_{ab} e $-V_{bc}$:

$$\begin{aligned} \frac{V_{ab} + (-V_{bc})}{2} &= \frac{V_a - V_b - V_b + V_c}{2} \\ &= \frac{-2V_b + (V_a + V_c)}{2} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Para um sistema equilibrado, tem-se:

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (3.24)$$

logo:

$$V_b = -(V_a + V_c) \quad (3.25)$$

substituindo-se (3.25) em (3.23), tem-se:

$$\frac{V_{ab} + (-V_{bc})}{2} = \left(\frac{3}{2}\right)(-V_b) \quad (3.26)$$

Portanto, da saída do divisor, obtém-se o sinal $-V_b$ multiplicado por uma constante igual a $3/2$.

Repetindo-se o procedimento anterior, obtém-se as tensões de

fase (V_b , $-V_b$, V_c , $-V_c$, V_a , $-V_a$) respectivamente, como é mostrado na figura III.5.

Para não influenciar o divisor de tensão e ter uma saída de baixa impedância, é utilizado o seguidor de tensão, como é mostrado na figura III.5.

O sincronismo para ângulos de gatilhamento $\alpha < 30^\circ$ é delicado, pois a variação do sinal de sincronismo é pequena. Para aumentar a variação do sinal de sincronismo, é somado a este sinal outro sinal conveniente, para estes valores de α . Assim, obtêm-se os sinais V_a , $-V_a$, V_b , $-V_b$, V_c e $-V_c$ de sincronização finais para cada tiristor, como é mostrado na figura III.5.

3.5.13.2 - Limitador da tensão de controle

O limitador tem como objetivo limitar a tensão de controle para que esta não seja superior ou inferior em amplitude aos sinais de sincronismo. (cf. fig. I.2). A figura III.5 mostra o circuito limitador obtido do secundário do transformador de sincronismo, com um retificador em ponte a diodos e um amplificador somador de ganho ajustável. O sinal limitador é em seguida filtrado por um filtro RC-seguidor de emissor, para eliminar as ondulações remanescentes do retificador. Em seguida, o sinal passa por um amplificador inversor de ganho ajustável e, finalmente, pelos diodos limitadores da tensão de controle.

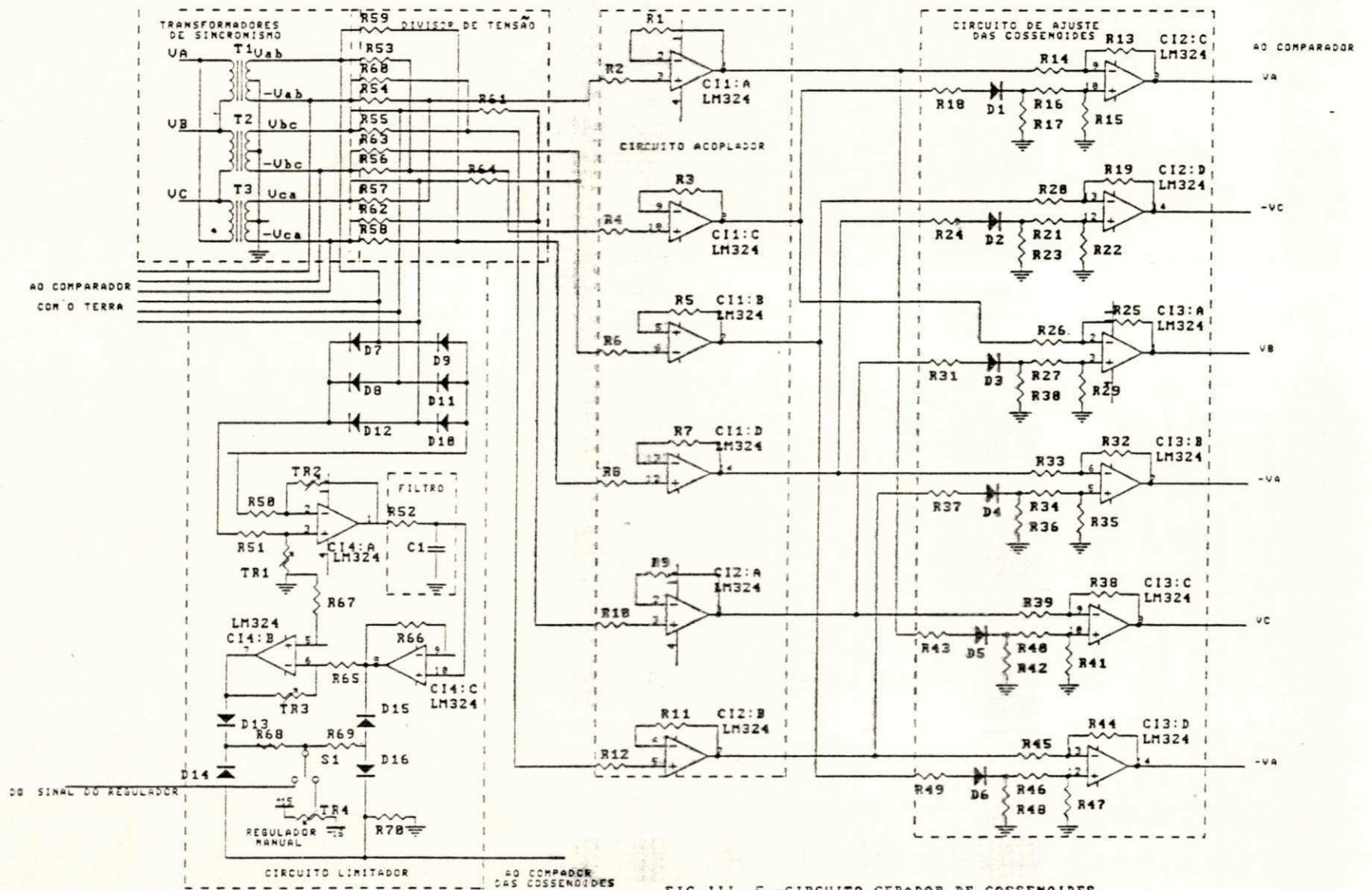


FIG. III.5 - CIRCUITO GERADOR DE COSSENOIDES

3.5.13.3 - Comparador de sinal de controle e sinal de sincronismo

A figura III.6 mostra o circuito comparador para os seis sinais de sincronismo, com o sinal de controle de regime. O comparador tem como objetivo produzir sinais discretos de 5V de amplitude e cuja transição de 0 a 5V corresponde ao instante de gatilho. Este instante é determinado quando os sinais de sincronismo e o sinal de controle são iguais, como mostra o diagrama de sinais na figura III.6(a).

Para limitar a variação do ângulo α a região de 180° possível são utilizados sinais obtidos da comparação dos sinais entre fases provenientes do transformador de sincronismo com zero. O circuito correspondente é mostrado na figura III.6 e representado no diagrama de sinais da figura III.6(b).

3.5.13.4 - Detetor de ângulo de gatilho " α "

Para detetar o ângulo de gatilhamento no instante em que o sinal de controle e o sinal de sincronismo são iguais, são utilizados três circuitos iguais com memórias tipo Flip-Flop, com entradas V_{br} e $-V_{br}$, V_{ar} e $-V_{ar}$, V_{or} e $-V_{or}$ e saídas V_{qb} , V_{qa} , V_{qc} , respectivamente. Na figura III.6(c) são mostrados os sinais de entrada V_{br} e $-V_{br}$ e o sinal de saída V_{qb} correspondente a um dos circuitos de memória, cuja tabela de verdade é mostrada na Tabela 3.4.

Os sinais obtidos na saída dos três circuitos de memória, mudam de estado a cada 180° Graus (largura 180°), e estão

defasados entre si de 60° . As seis transições de estado, presentes no conjunto dos três sinais, correspondem exatamente aos instantes de gatilho dos tiristores. O circuito correspondente é mostrado na figura III.6.

TABLA 3.4

| V_{bz} | $-V_{bz}$ | V_{ab} | \bar{V}_{ab} |
|----------|-----------|----------|----------------|
| 0 | 0 | 0 | 5 |
| 5 | 0 | 5 | 0 |
| 0 | 0 | 5 | 0 |
| 0 | 5 | 0 | 5 |
| 0 | 0 | 0 | 5 |

3.5.13.5 - Circuito formador do sinal de gatilhamento

A figura III.6 mostra o circuito formador do sinal de gatilhamento para cada tiristor. Para obter os sinais de gatilho para cada tiristor com largura de 120° elétricos, são utilizados convenientemente, os sinais obtidos do circuito de memórias. Na figura III.6(d) é mostrado o sinal de gatilho do tiristor 1 (V_{ab1}) obtido da combinação dos sinais V_{qb} e V_{ao} .

Para garantir a passagem desses sinais pelo transformador de pulso ele é modulado com um trem de pulsos de 1KHz.

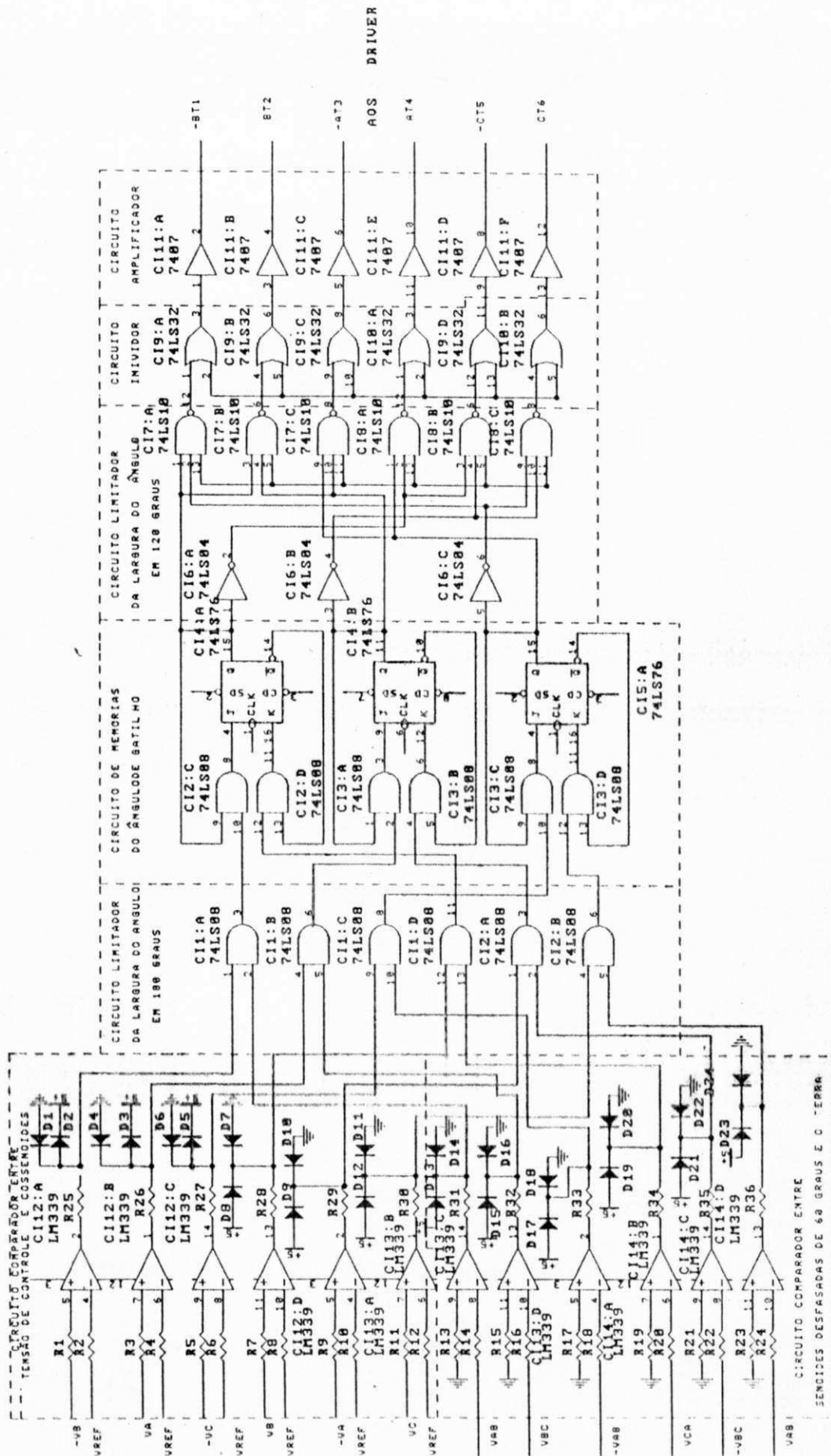
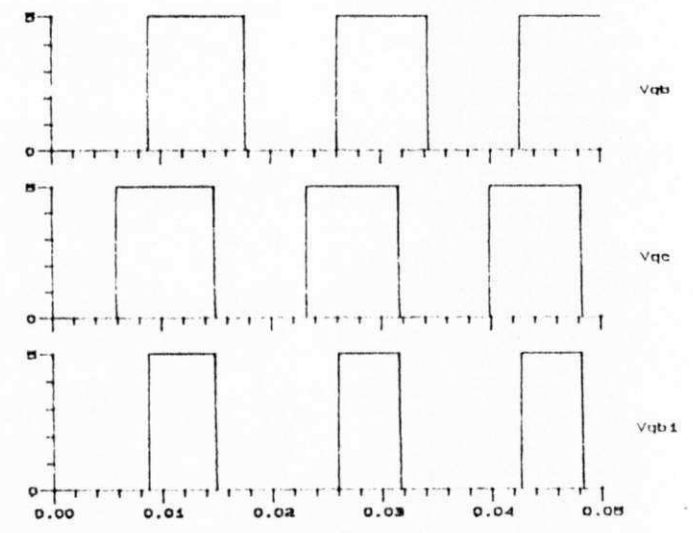
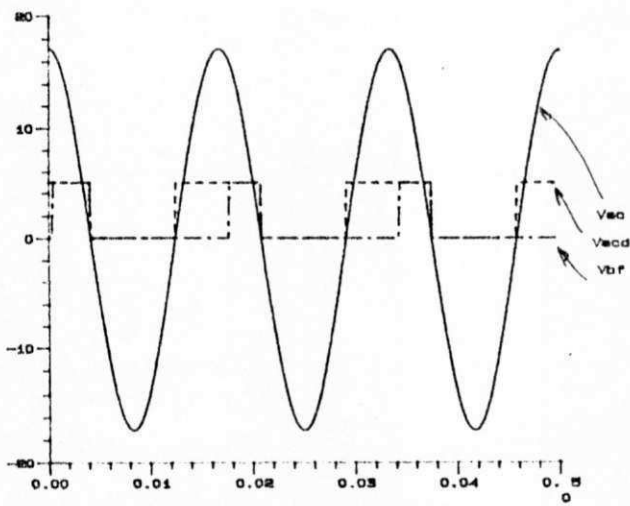
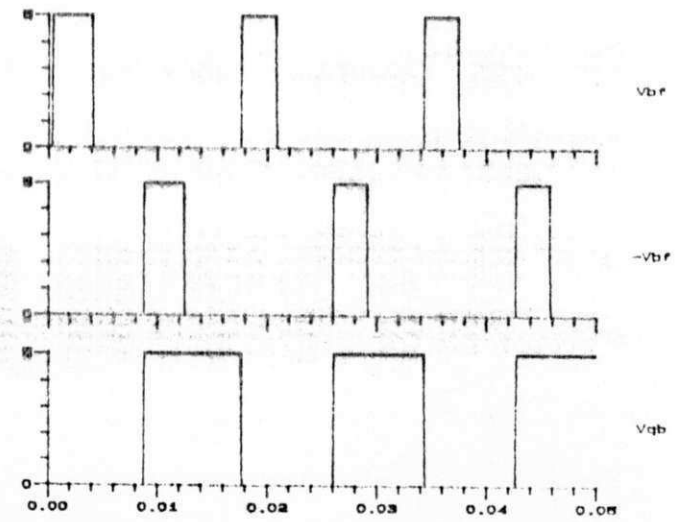
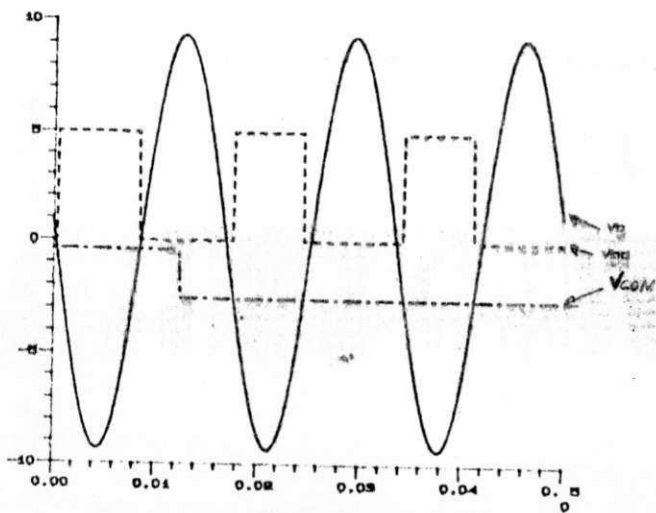


FIG. III.6 - CIRCUITO GERADOR DO ÂNGULO DE BATILHO



3.5.13.6 - Inibidor de pulso

O circuito inibidor de pulso tem como função anular o trem de pulso que é enviado a cada tiristor fazendo-se com que a ponte seja desconectada da carga. A figura III.6 mostra o circuito inibidor de pulso, comandado pelo circuito de proteção de sobretensão do microgerador.

3.5.13.7 - Amplificador adaptador de pulso 5V/15V

Este circuito mostrado na figura III.6 tem como finalidade adaptar o trem de pulso de 5V para 15V, da tensão do trem de pulso compatível com a tensão do circuito amplificador de pulso "drivers".

3.5.13.8 - Circuitos amplificadores de pulso "drivers"

Os sinais de gatilho a saída dos circuitos lógicos TTL não possuem níveis de corrente suficientes para gatilhar os tiristores, portanto é necessário utilizar um circuito amplificador de corrente. Em seguida, é apresentado o circuito amplificador de pulsos utilizados.

Analisando-se a figura III.7, tem-se que: Se o sinal de entrada é igual a 15V, a saída do amplificador operacional será zero. Logo, os transistores Q_1 e Q_2 não são polarizados, conseqüentemente as correntes I_1 e I_2 , serão nulos, não havendo gatilhamento nos tiristores. Se o sinal de entrada é igual a 0V, a saída do amplificador operacional será 15V, neste instante o transistor Q_1 é polarizado e I_1 flui através do transistor

amplificando em corrente o sinal que serve para polarizar o transistor Q₂. Assim, um pulso de corrente I₂ passa pelo transformador de pulso gerando um pulso no secundário do transformador, gatilhando o tiristor.

O diodo D₂ é um caminho para que a corrente do transformador de pulso seja descarregada quando ocorre a abertura do transistor Q₂. O diodo zener D₃ limita os "spikes" de tensão na abertura do transistor Q₂.

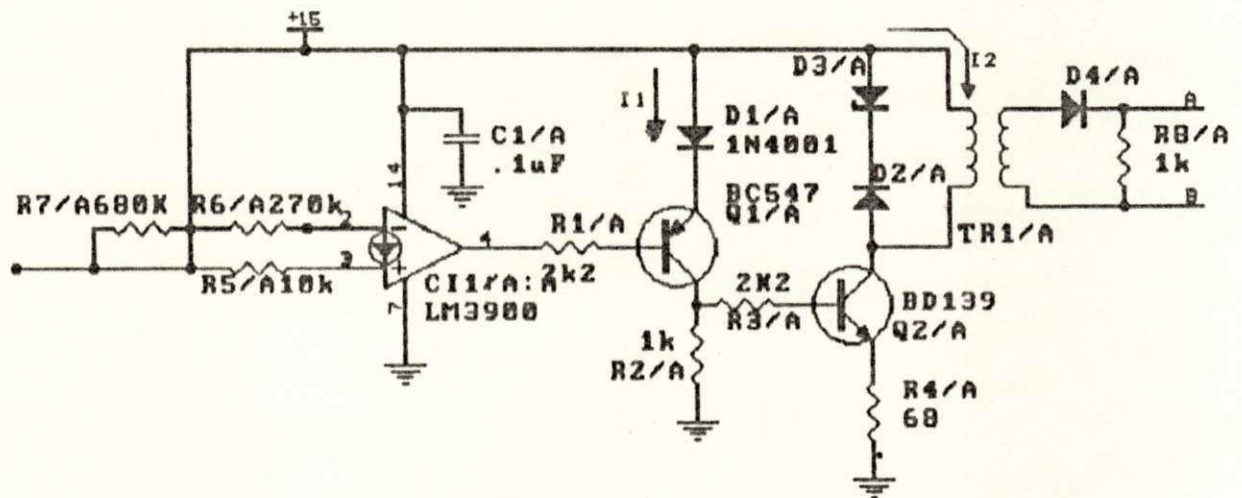


Fig III.7 - CIRCUITO AMPLIFICADOR DE PULSO PARA CADA TIRISTOR

3.5.14 - Resultados experimentais da ponte trifásica simétrica

As figuras III.8 e III.9 mostram a forma de onda da tensão de saída da ponte trifásica que alimenta o microgerador com carga e sem carga respectivamente. Nota-se que existe outro sinal que é proveniente de um "soon" aplicado no centro da figura e mostra em detalhe o fenómeno da comutação.

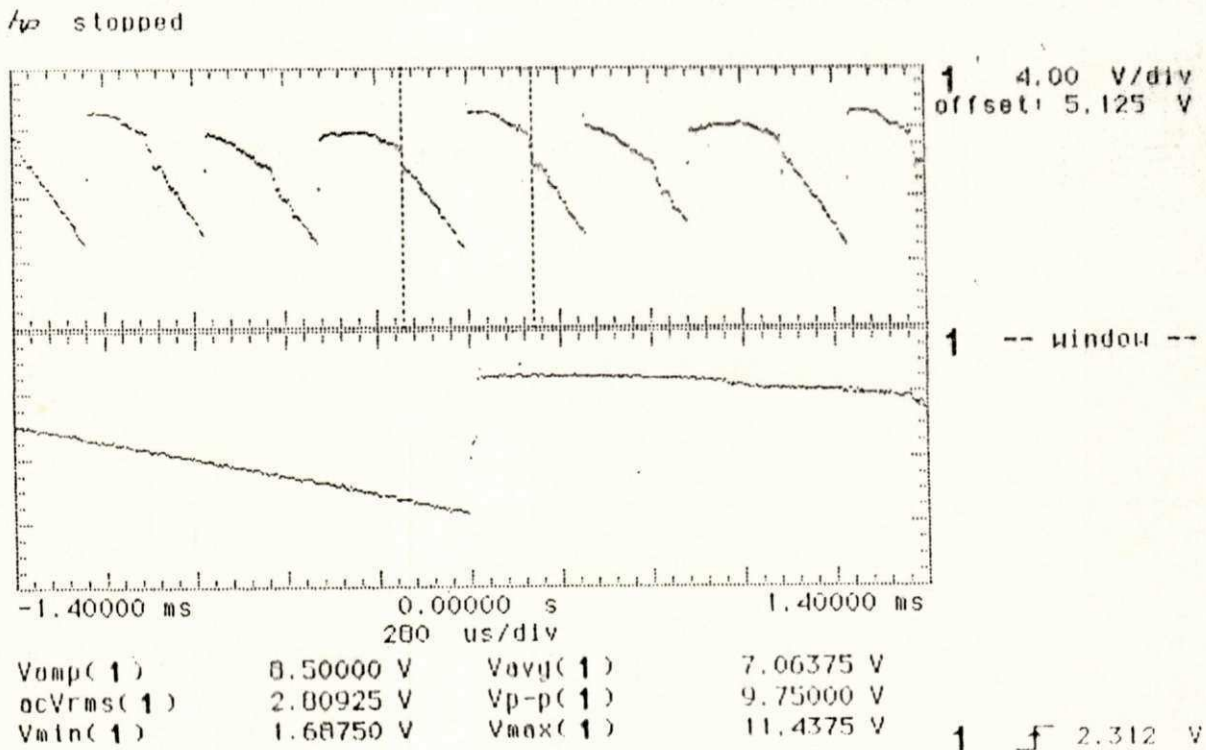


Figura III.8 - Forma de onda experimental da tensão de campo do microgerador com carga de 1500 Watts.

hp stopped

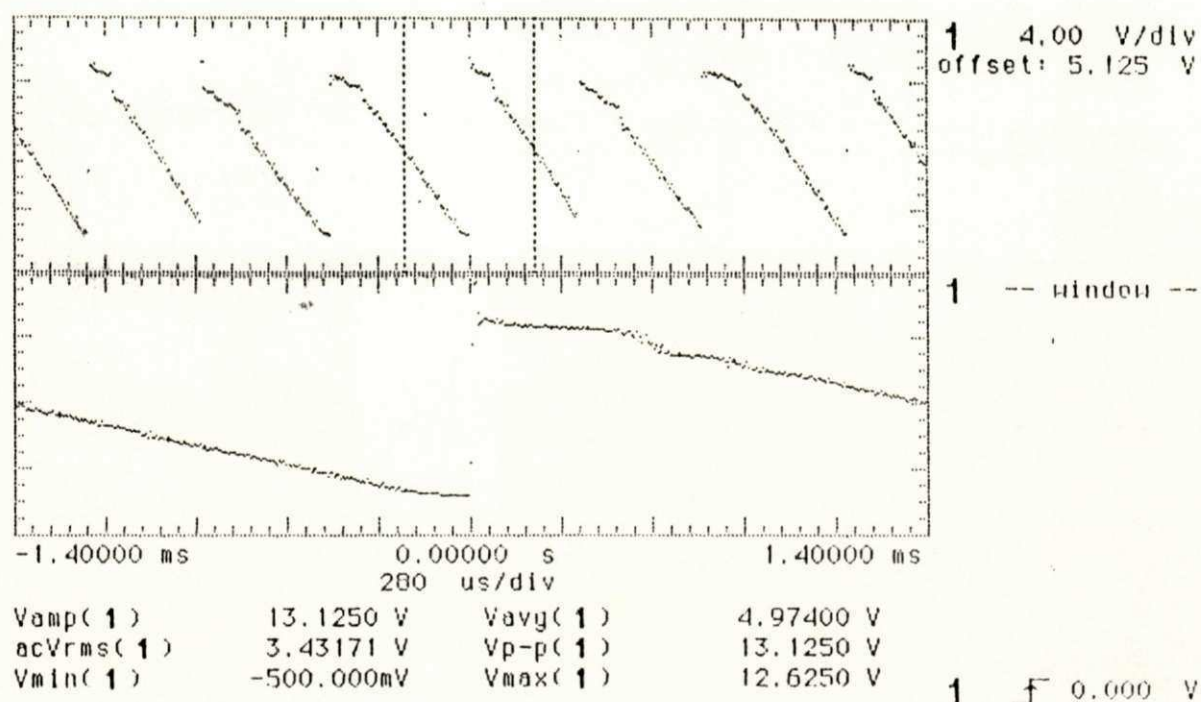


Figura III.9 - Forma de onda experimental do campo do microgerador em vazio

3.6 - CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentadas as características de um microgerador síncrono projetado para estudos de estabilidade em sistemas de potência, bem como o projeto do sistema de excitação estática (ponte trifásica simétrica) para o microgerador de 3KVA. Os resultados experimentais apresentados, mostram que o desempenho da ponte trifásica simétrica é satisfatório, podendo assim ser ampliado o uso desta ponte no controle de velocidade para do motor cc que está acoplado ao microgerador.

CAPÍTULO 4

REGULADOR DE TENSÃO PARA MICROGERADORES

4.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o cálculo do modelo matemático do regulador de tensão automático, utilizando as técnicas de controle apresentadas por Bülher, (1979). Também serão apresentados os circuitos da malha de regulação de tensão.

4.2 - PONTE RETIFICADORA A DIODOS

A ponte retificadora de sinal é mostrada na figura IV.1. Tem como finalidade retificar a tensão trifásica do microgerador para obter um sinal CC representativo da tensão terminal.

A tensão média da ponte V_{tr} é dada pela seguinte equação:

$$V_{tr} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \times V_{tm} \quad (4.1)$$

$$\frac{V_{tr}}{V_{tm}} = 1.35 = K_R \quad (4.2)$$

onde: K_R é o ganho da ponte retificadora a diodos.

V_{tm} é a tensão eficaz de linha do secundário do transformador de sinal.

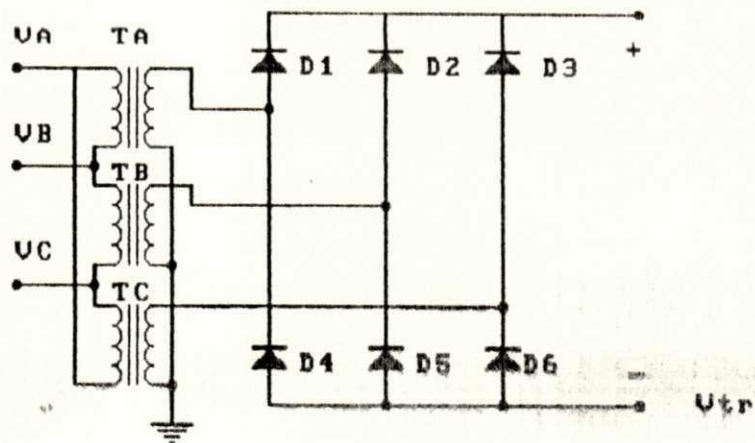
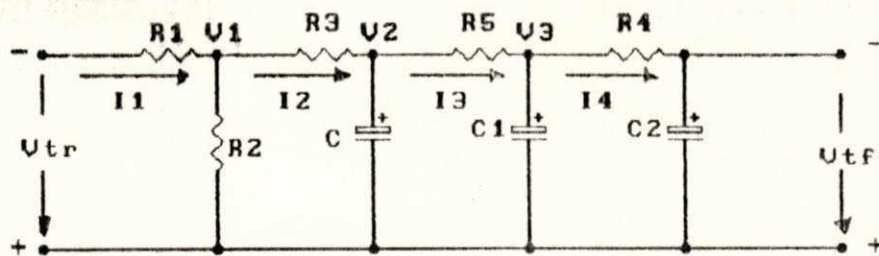


figura IV.1 Ponte retificadora



$$R2 = R3 = R4$$

$$C = C1 = C2$$

figura IV.2 Filtro de sinal RC

4.3 - FILTRO DE SINAL RC

O filtro de sinal RC é mostrado na figura IV.2. Tem como finalidade filtrar sinais AC remanescentes da retificação.

V_{tr} é um sinal contínuo proporcional ao valor real da amplitude da tensão terminal do microgerador que será comparado com o valor da tensão de referência.

4.3.1 - Função transferência do filtro de sinal RC

Do circuito da figura IV.2, tem-se as seguintes relações:

$$V_3 - V_{tr} = R_2 I_4 \quad (4.3)$$

$$V_2 - V_3 = R_2 I_3 \quad (4.4)$$

$$V_1 - V_2 = R_2 I_2 \quad (4.5)$$

$$V_{tr} - V_1 = R_1 I_1 \quad (4.6)$$

$$I_4(t) = C \frac{d V_{tr}(t)}{dt} \quad (4.7)$$

$$I_3(t) - I_4(t) = C \frac{d V_3(dt)}{dt} \quad (4.8)$$

$$I_2(t) - I_3(t) = C \frac{d V_2(t)}{dt} \quad (4.9)$$

$$I_1(t) - I_2(t) = \frac{V_1(t)}{R_2} \quad (4.10)$$

Aplicando transformada de Laplace as eqs. (4.6 a 4.10) e considerando-se que as condições iniciais são nulas tem-se:

$$L[I_4(t)] = CV_{tr}(S)S \quad (4.11)$$

$$L[I_3(t) - I_4(t)] = CV_3(S)S \quad (4.12)$$

$$L[I_2(t) - I_3(t)] = CV_2(S)S \quad (4.13)$$

onde: L é operador de Laplace.

Das equações (4.11 a 4.13), obtém-se a função transferência do filtro de sinal RC, isto é:

$$G_F(S) = \frac{V_{tr}(S)}{V_{tr}(S)} = \frac{R_2}{(R_1+R_2) + 2R_1(R_2CS)^3 + (R_2)4(CS)^3 + 9R_1(R_2CS)^2 + 5(R_2)^3(CS)^2 + 9R_1R_2CS + 6(R_2)^2CS} \quad (4.14)$$

Dividindo o numerador e denominador de $G_F(S)$ por $(R_1 + R_2)$ e ajustando R_1 e R_2 tal que V_1 seja 7V e a tensão terminal do microgerador em vazio seja 220V, tem-se:

$$R_1 = 4,7K \quad R_2 = 2,2K \quad (4.15)$$

Para ajustar a constante de tempo do filtro T_F dentro da faixa dos filtros utilizados em grandes sistemas de geração $0 < T_F < 0,06s$ (Anderson, 1977) ajusta-se o valor do capacitor C tal que o coeficiente dos termos em S de expoente maior que um sejam bem pequenos e possam ser desprezados e que o coeficiente do termo em S de expoente 1, esteja dentro da faixa do filtro especificado.

Escolhendo-se o valor $C = 2,2 \mu F$, e substituindo-se os valores de R_1 e R_2 em (4.14), tem-se:

$$G_F(S) = \frac{0.3188404}{1 + 1.9 \times 10^{-7}S^3 + 1.81 \times 10^{-4}S^2 + 0.03893S} \quad (4.16)$$

cuja raízes do polinômio do denominador de $G_F(S)$ são:

$$S_1 = 640.75 \quad S_2 = 273.22 \quad S_3 = 29.64 \quad (4.17)$$

Considerando-se que os coeficientes dos termos S^2 e S^3 do denominador de $G_F(S)$ são muito pequenos e as raízes S_1 e S_2 são grandes, podem-se realizar a seguinte aproximação:

$$G_F(S) \approx \frac{0.32}{1 + 0.03893S} = \frac{K_F}{1 + T_F S} \quad (4.18)$$

onde: K_F é o ganho do filtro e T_F é a constante de tempo do filtro de sinal RC.

4.4 - DIAGRAMAS DE BLOCOS E FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

Da equação (2.25) e (2.81) obtém-se a função de transferência do $G_{MG}(S)$ do microgerador em vazio sem considerar os enrolamentos amortecedores, cujo ganho K_{MG} é obtido da relação entre tensão terminal e tensão de excitação, isto é:

$$G_{MG}(S) = \frac{V_t(S)}{V_f(S)} = \frac{K_{MG}}{1 + T'_{ao}S} \quad (4.18)$$

$$K_{MG} = \frac{220}{5.8} = 37.93 \quad (4.19)$$

O ganho do transformador de potencial de sinal é obtido é obtido da relação de transformação do transformador, isto é:

$$K_T = 0.0578 \quad (4.20)$$

O ganho da ponte retificadora a diodo é: (cf. eq. 2.4)

$$K_R = 1.35 \quad (4.21)$$

A função de transferência do filtro de sinal RC $G_F(S)$ obtida de (4.18) é:

$$G_F(S) = \frac{V_{tz}(S)}{V_{tr}(S)} = \frac{K_F}{1 + T_F S} \quad (4.22)$$

A função de transferência da ponte trifásica simétrica $G_P(S)$ é: (cf. eq. 3.13)

$$G_P(S) = \frac{V_x(S)}{V_{com}(S)} = \frac{K_P}{1 + T_P S} \quad (4.23)$$

A função transferência do circuito de medição $G_{FM}(S)$ é:

$$G_{FM}(S) = G_F(S)K_TK_R = \frac{K_{FM}}{1 + T_F S} \quad (4.24)$$

onde: $G_{FM}(S)$ é a função transferência que agrupa a função de transferência do filtro, do retificador a diodos e do transformador de sinal. T_F é também chamado de constante do circuito de medição. O ganho do circuito de medição K_{FM} é:

$$K_{FM} = K_FK_RK_T \quad (4.25)$$

A figura IV.3, mostra o diagrama de blocos do circuito de regulação de tensão do microgerador no domínio de Laplace.

A figura IV.4 mostra o diagrama de blocos do sistema de regulação de tensão com a nova função de transferência do circuito de medição $G_{FM}(S)$.

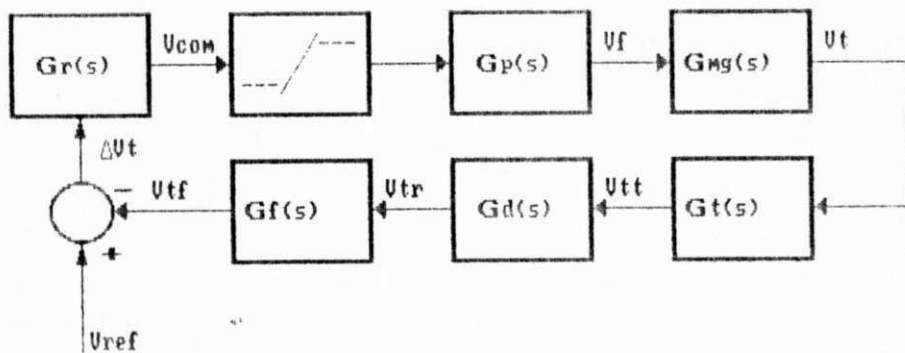


Fig.IV.3 - Diagrama de blocos do circuito de regulação de tensão no domínio Laplace

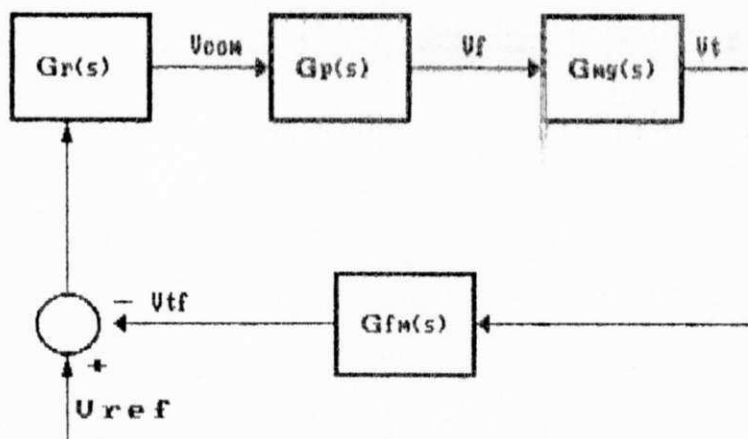


Fig.IV-4 - Diagrama de blocos reduzido do circuito de regulação de tensão do microgerador

4.5 - PEQUENAS CONSTANTES DE TEMPO

Chama-se pequenas constantes de tempos as constantes de tempo envolvidas no circuito de regulação da ordem de alguns milissegundos, considerando-se as aproximações sugeridas por Bülher, (1979) para pequenas constantes tem-se:

$$G_{PF}(S) = G_P(S)G_{FM}(S) \quad (4.26)$$

$$G_{PF}(S) = \frac{K_{FM}K_P}{(1 + T_F S)(1 + T_P S)} \quad (4.27)$$

Fazendo $K_{PF} = K_{FM}K_P$, tem-se:

$$G_{PF}(S) = \frac{K_{PF}}{(1 + T_F S)(1 + T_P S)} \quad (4.28)$$

onde: $G_{PF}(S)$ é o produto de duas funções de transferência cujas constantes de tempo T_{FM} e T_P são da ordem de alguns milissegundos, pode-se realizar as seguintes aproximações:

$$\frac{1}{1 + T_{FM}S} \approx e^{-ST_{FM}} \quad (4.29)$$

$$\frac{1}{1 + T_P S} \approx e^{-ST_P} \quad (4.30)$$

Substituindo (4.29) e (4.30) em (4.28), tem-se:

$$G_{PF}(S) = K_{PF} e^{S(T_F + T_P)} \quad (4.31)$$

$$G_{PF}(S) \approx \frac{K_{PF}}{1 + T_{PF}S} \quad (4.32)$$

onde:

$$T_{PF} = T_F + T_P \quad (4.33)$$

A figura IV.5 mostra o diagrama de blocos do sistema reduzido.

4.6 - ESCOLHA DO REGULADOR

A escolha do regulador depende da função de transferência do sistema em malha aberta, isto é:

$$G_a(S) = G_{PF}(S)G_M(S) \quad (4.34)$$

$$G_a(S) = \frac{K_S}{(1 + T'_{do}S)(1 + T_{PF}S)} \quad (4.35)$$

onde:

$$K_S = K_{PF}K_M = K_F K_R K_T K_P K_M \quad (4.36)$$

Analisando a função transferência do sistema em malha aberta $G_a(S)$ nota-se que há presente uma constante de tempo dominante T'_{do} , e uma constante pequena T_{PF} , considerando-se que para anular o erro em regime permanente do sistema que é caracterizado por um modelo de primeira ordem, conclui-se que o regulador mais adequado para este sistema é o regulador proporcional integral, cuja função de transferência no domínio de Laplace é:

$$G_R(S) = \frac{1 + ST_n}{T_I S} \quad (4.37)$$

onde: $G_R(S)$ é a função transferência do regulador proporcional integral.

A figura IV.6 mostra o diagrama de blocos completo do sistema de regulação de tensão do microgerador.

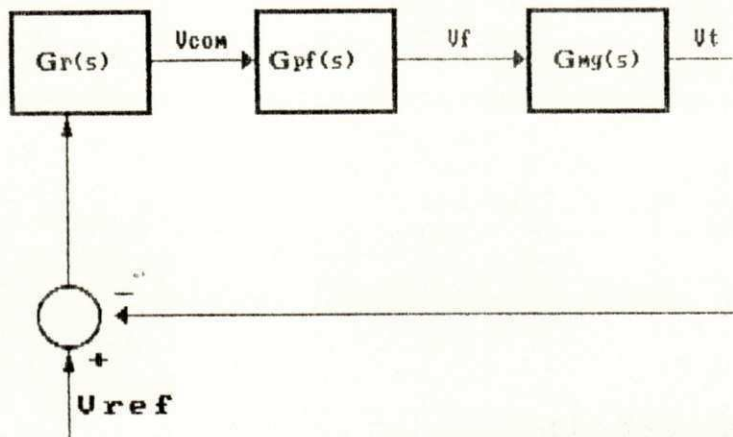


Fig.IV-5 - Diagrama de blocos simplificado do circuito de regulação de tensão do microgerador síncrono

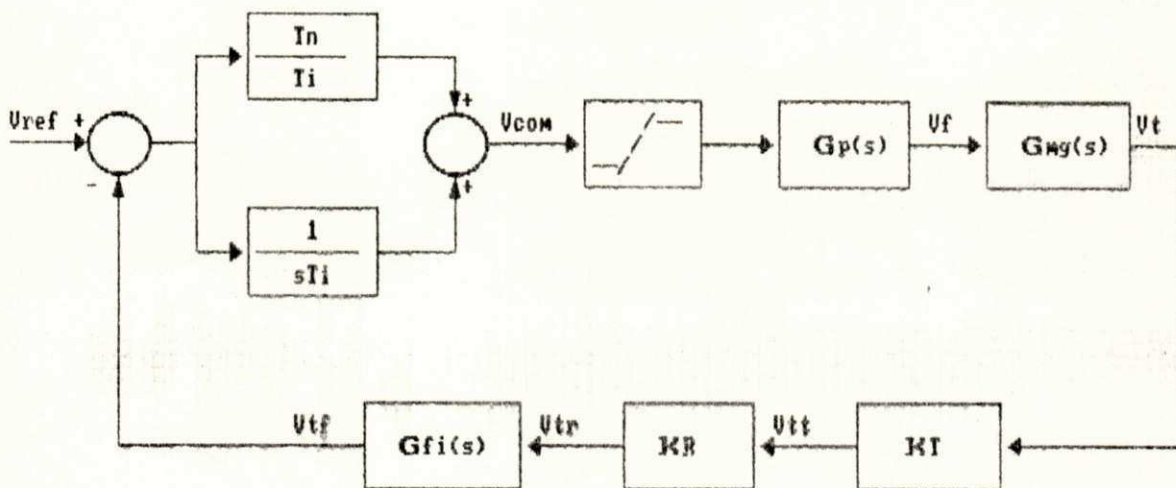


Fig. IV-6 Diagrama de blocos do modelo do sistema de regulação de tensão do microgerador síncrono

4.7 - CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO REGULADOR PI

Analisando-se a função transferência de malha aberta $G_o(S)$ do sistema onde o regulador PI permite a compensação da constante dominante do sistema, simplesmente ajustando-se o valor $T_n = T'_{ao}$, isto é:

$$G_o(S) = G_R(S)G_S(S) \quad (4.38)$$

$$G_o(S) = \frac{(1 + ST_n)}{T_I S} \cdot \frac{K_S}{(1 + T'_{ao}S)(1 + T_{PF}S)} \quad (4.39)$$

substituindo $T_n = T'_{ao}$, tem-se:

$$G_o(S) = \frac{K_S}{T_I S(1 + T_{PF}S)} = \frac{1}{T_1 S(1 + T_{PF}S)} \quad (4.40)$$

onde:

$$T_1 = \frac{T_I}{K_S} \quad (4.41)$$

Para-se calcular a constante de tempo T_1 , do regulador PI considera-se o critério de amortecimento ótimo sugerido por Bü- lher, (1979), tem-se:

- para ter um amortecimento "overshoot" menor que 10%, deve-se seguir a seguinte relação:

$$\frac{T_{PF}}{T_1} \leq 0.7 \quad (4.42)$$

$$\phi \leq 68^\circ \quad (4.43)$$

onde: ϕ é a margem de fase

- para que o tempo de resposta do sistema não se torne muito lento, a relação a seguir é:

$$\frac{T_{PF}}{T_1} \geq 0.4 \quad (4.44)$$

$$\phi \geq 58^\circ$$

- uma escolha ótima é:

$$\frac{T_{PF}}{T_1} = 0.5 \quad (4.45)$$

$$\phi = 63.5^\circ$$

Substituindo-se T_1 em (4.44) e (4.41), tem-se:

$$T_I = T_{PF} K_B / 0.5 \quad (4.46)$$

Substituindo-se (4.45) em (4.36), tem-se:

$$T_I = 2 T_{PF} K_T K_R K_F K_P K_M G \quad (4.47)$$

Substituindo-se os ganhos e a constante de tempo por seus respectivos valores, tem-se:

$$T_I = 0.175 \quad (4.48)$$

4.8 - CIRCUITO DO REGULADOR PROPORCIONAL INTEGRAL

A figura IV.7 mostra o circuito elétrico que representa o regulador PI caracterizado pela seguinte função transferência:

$$G_R(S) = \frac{SR_cC_1}{1 + SR_1C_1} \quad (4.49)$$

comparando (4.49) com (4.37), tem-se as seguintes igualdades:

$$T_n = R_1C_1 = 0.55 \quad (4.50)$$

$$T_I = R_cC_1 = 0.175 \quad (4.51)$$

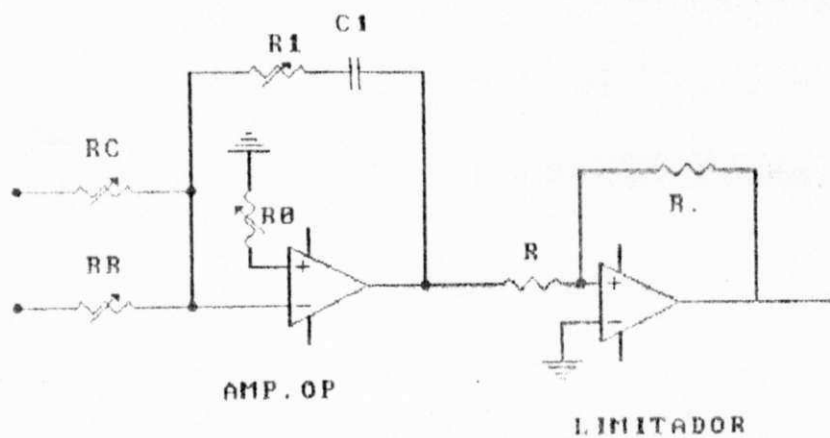


FIGURA 4U.7 Circuito eletrônico do regulador PI

Logo, para satisfazer a igualdade escolhe-se:

$$C_1 = 1\mu F \quad R_1 = 55K\Omega \quad R_C = R_r = 175K\Omega \quad (4.52)$$

4.8.1 - Compensação da corrente de polarização do circuito do regulador PI

Para que a corrente de polarização permaneça constante, o valor de R_o é obtido da seguinte relação:

$$\frac{1}{R_o} = \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_r} \quad (4.53)$$

4.9 - CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO REGULADOR PI CONSIDERANDO OS EFEITOS DOS ENROLAMENTOS AMORTECEDORES DO MICROGERADOR

De (2.25) e (2.80), obtém-se a função de transferência $G'_{MG}(S)$ do microgerador em vazio, considerando os enrolamentos amortecedores do microgerador,

$$G'_{MG}(S) = \frac{V_t(S)}{V_r(S)} = \frac{K_{MG}}{(1 + ST'_{do})} \frac{1}{(1 + ST''_{do})} \quad (4.54)$$

onde: a constante de tempo T''_{do} é pequena, comparada com T'_{do} , logo pode-se aplicar o critério das pequenas constantes de tempo, isto é:

$$T'_{PF} = T_M + T_P + T'_{do} \quad (4.55)$$

Substituindo-se (4.55) em (4.47) obtém-se um novo valor de T_I .

$$T_I = 0.22 \quad (4.56)$$

Substituindo-se (4.56) em (4.51) e (4.52), obtêm-se os seguintes valores:

$$C_1 = 1\mu\text{F} \quad R_1 = 55\text{K}\Omega \quad R_C = R_r = 220 \text{ K}\Omega \quad (4.57)$$

Comparando-se (4.51) com (4.56), nota-se que para compensar os enrolamentos amortecedores do microgerador, basta mudar os valores de R_C e R_r para satisfazer a igualdade do novo valor de T_r .

4.10 - LIMITADOR DO REGULADOR PI

O limitador basicamente é um circuito seguidor de tensão de ganho ajustável para limitar a tensão de saída do regulador PI, e com isto evitar saturação da tensão de excitação no campo do microgerador, cujo circuito é mostrado na figura IV.7.

4.11 - PROTEÇÃO POR SOBRETENSÃO DO MICROGERADOR

A proteção do microgerador por sobretensão é obtida utilizando-se um circuito comparador de ajuste variável como é mostrado na figura IV.8 e cuja função principal é proteger o microgerador em caso de ocorrer um defeito nos circuitos de controle.

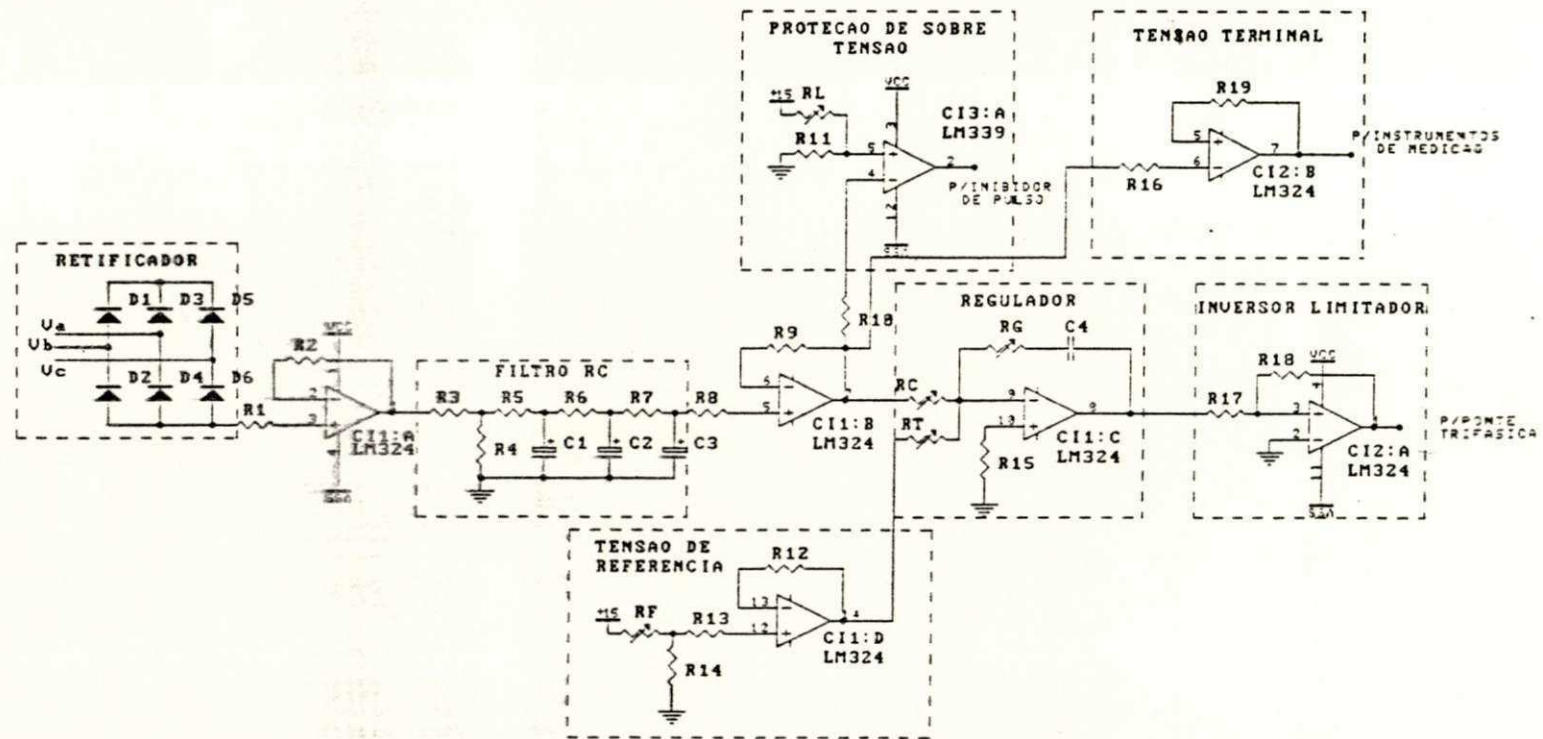


Figura IV.8 - Circuito de regulação de tensão do microgerador de 3kva

4.12 - CIRCUITO GENERALIZADO PARA DIFERENTES AJUSTES DOS PARÂMETROS DO REGULADOR PI (T_n e T_I)

Considerando-se que o microgerador possui uma constante de tempo T ao 10 vezes menor que os geradores de grandes potências, pode ser utilizado um regulador de constante de tempo para aumentar as constantes de tempo do rotor, utilizando-se uma fonte de alto ganho (PWM) e utilizando-se enrolamentos auxiliares alocados no rotor do microgerador (Sheard, 1971). Entretanto este procedimento não foi realizado neste trabalho.

4.13 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO REGULADOR DE TENSÃO DO MICROGERADOR

A figura IV.9(3) mostra a forma de onda da tensão de controle na saída do regulador PI, cujos parâmetros são $T_n = 0.55$, e $T_I = 0.22$ para quatro transitórios produzidos por uma carga (lâmpadas) de 1500 Watts nos terminais do microgerador. Estes transitórios dão origem a atuação imediata do regulador de tensão. A figura IV.9(1) mostra uma forma de onda, que é uma imagem da tensão de saída do microgerador para os mesmos transitórios.

A figura IV.10(1) mostra a forma de onda da tensão em regime permanente sem carga depois do filtro de sinal RC. A figura IV.10(3) mostra a forma de onda depois da tensão em regime permanente sem carga depois da ponte retificadora a diodo.

hp stopped

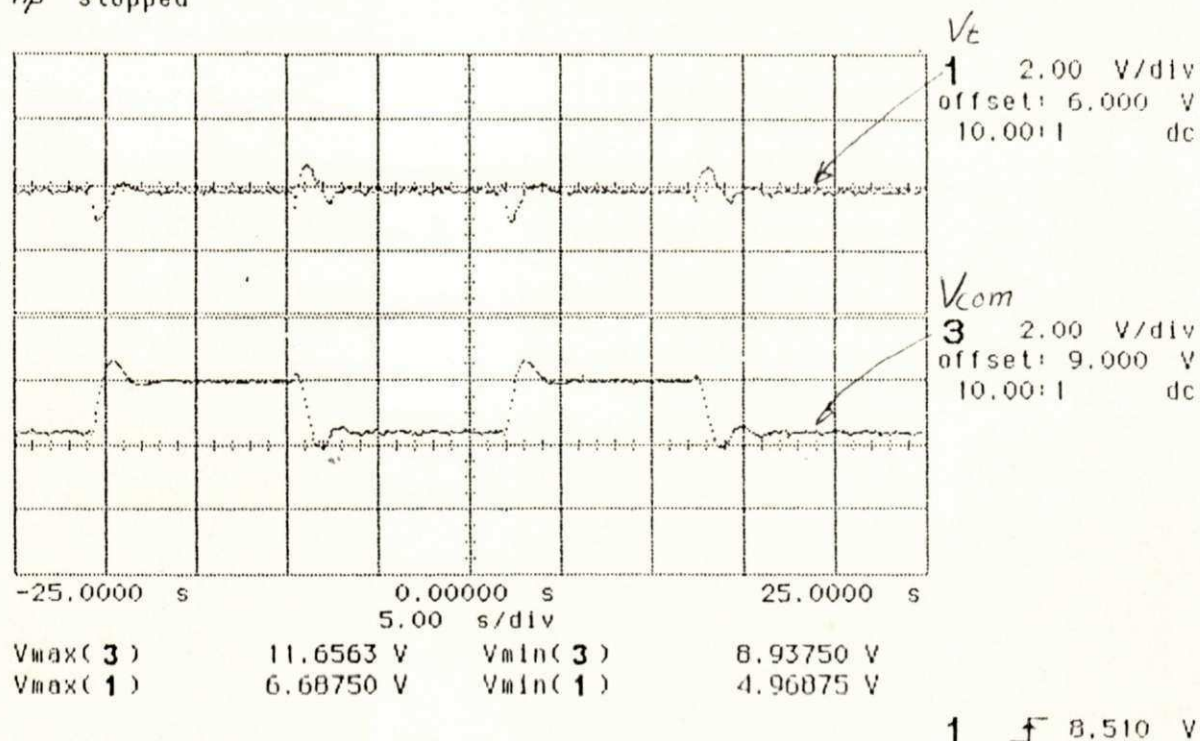


Figura IV.9-(3) Tensão de saída do regulador PI $V_{com}(t)$
 Figura IV.9-(1) Tensão contínua proporcional a tensão terminal

hp running

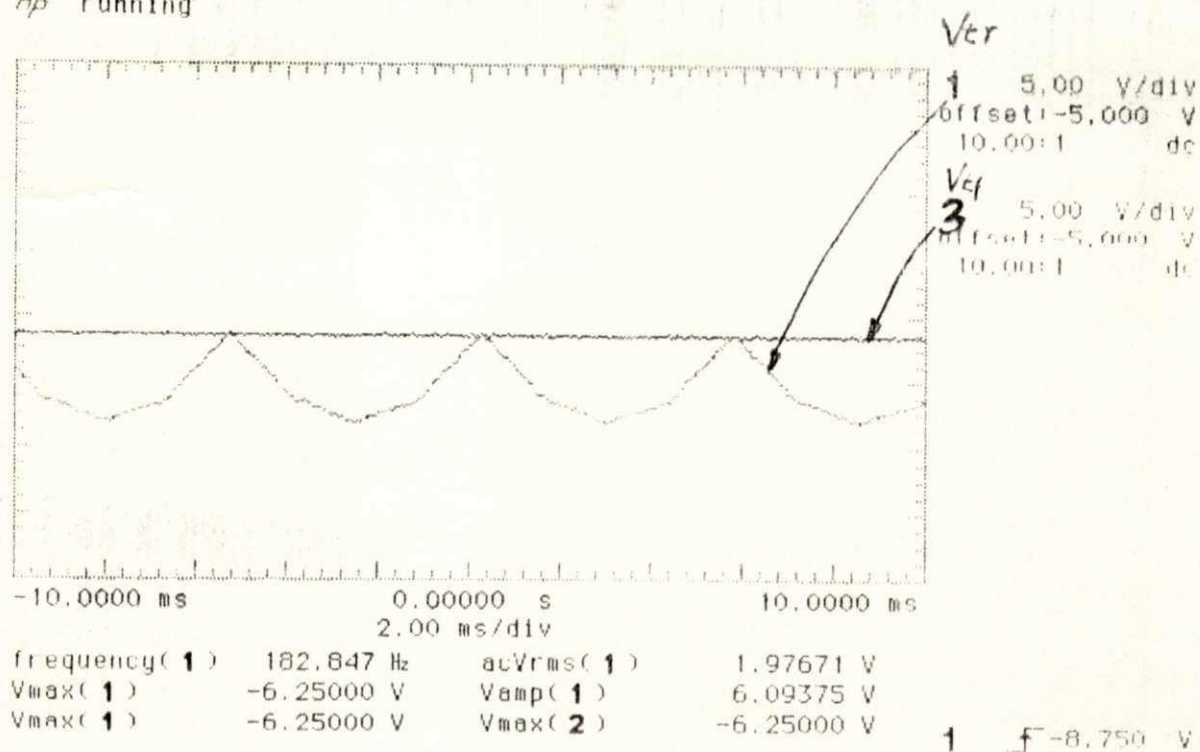


Figura IV.10-(1) Tensão de saída da ponte a diodo $V_{tr}(t)$
 Figura IV.10-(3) Tensão de saída do filtro RC $V_{tr}(t)$

4.14 - CONCLUSÃO

Neste capítulo, foi apresentado o projeto de um regulador proporcional integral para controlar automaticamente a tensão do microgerador. O critério para o cálculo do regulador foi o da compensação de polo dominante com amortecimento ótimo.

Os resultados experimentais apresentados, mostram que o desempenho do regulador de tensão é satisfatório, como mostram as seguintes conclusões:

Variando-se R_c e R_r , esta se ajustando o parâmetro T_I , que está ligado a constante de tempo pequena e aos ganhos do sistema

Variando-se R_1 , esta se ajustando o parâmetro T_n , que é o parâmetro de compensação do polo dominante.

Para valores de R_c e R_r abaixo dos valores calculados, o regulador tende a se tornar mais rápido na sua resposta, mas traz consigo, as oscilações indesejáveis.

Para valores de R_c e R_r acima dos valores calculados, o regulador tende a se tornar mais lento, mas em compensação, desaparecem as oscilações.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

Neste trabalho, foi apresentado o projeto, simulação e implementação do sistema de excitação e regulação de tensão para um microgerador síncrono de 3KVA.

Dentro das vantagens do trabalho apresentado, pode-se citar:

1) A aplicabilidade do trabalho pode ser estendida para geradores síncronos de maior potência.

2) Os resultados experimentais e simulados mostram um bom desempenho do sistema que pode ser utilizado como suporte, para pesquisas mais adiantadas em estabilidade de sistemas de potência.

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS

1) Ponte trifásica simétrica:

Os resultados da simulação digital da ponte são similares àqueles obtidos experimentalmente.

2) Regulador de tensão PI

Os resultados da simulação digital do regulador de tensão PI, possui características de funcionamento semelhantes àqueles obtidos experimentalmente, embora nota-se que o regulador

simulado se comporta com maior rapidez na sua resposta. Isto se dá pelo fato que na simulação digital o ângulo de carga do microgerador é constante.

3) Microgerador

Os resultados da simulação digital do microgerador possui uma característica bastante aproximada, embora o modelo da simulação seja uma representação com algumas aproximações. Estas aproximações dão origem a um erro de cerca de 7% do modelo real.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

1) Interligação do microgerador ao modelo reduzido de um sistema de transmissão.

2) Compensação do ângulo de carga no controle da tensão do microgerador. Neste sentido estudos posteriores poderão ser realizados para introduzir um sinal estabilizador no regulador de tensão (Concórdia, 1969).

3) Implementação do regulador de velocidade para o motor CC acoplado ao microgerador.

4) Implementação do regulador de constante de tempo do microgerador.

BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, P.M. & FOUAD, A., Power system control and stability, Editora IOWA, University IOWA, USA, 1977, 465p.
- ADKINS, B., General theory of electrical machines, Chapman & Hall, 1957.
- BULHER, H., Electronique de puissance, Editions Geogi, 2ª Edição 1981.
- BULHER, H., Electronique de réglage et de comande, Editora Dunod, 1979.
- Concordia, C., Synchronous machines, teory and performance, Wiley 1957
- DE MELLO, F.P. & CONCORDIA, C., Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol.88, N# 4, Abril 1969, 316-327 p.
- DEVOTTA, J.B.X., An electronic excitation control system for the microalternator, Electric Machines and Power Systems, November 1986, 263-272 p.
- HAMMONS, T.J. & PERSONS, A.J., Design of micro-alternator for ower system stability investigations, Proc. IEE 118, No. 10, September 1970, 1421-1441 p.
- HAMMONS, T.J. & WINNING D.J., Comparisons of synchronous-machine models in the study of the transient behaviour of

electrical Power Systems, Proc. IEE, Vol. 118, No. 10, October 1971, 1442-1458 p.

- HOWE, A.F. & NEWBERRY P.G., Semiconductor fuses and their applications, IEE Proc. Vol. 127, Pt.B. No. 3, May 1980, 155-168 p.

- IEEE Committee Report, Computer representation of excitation systems, IEEE Trans. on PAS, June 1968.

- IEEE Publication, Test procedure for synchronous machine, 115 p., 1965.

JACOBINA, C.B., Máquinas eléctricas, apostila do curso de pos-graduação de Eng. Eletrica, DEE/CCT/UFPB, 1984.

- JARDIM, A.B, et alli, Filosofia de projeto de sistemas de excitação estáticos para geradores síncronos, 6º Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 1986.

- KOSTENKO, M.P. 7 & URASOV, I.D.: Electrodynamic modelling of the kyibyshev power station, ibid, 1955 (8), pp. 11-19, URSS.

- KOSTENKO, M.P., Electrodynamic modelling of power systems, Moscow, 1950.

- KIMBARK, E.W., Power System Stability, Synchronous machines. power publications, Inc. New York, 1968, 322p.

- LUCIANO, B.A., Sistemas de excitação e regulação de tensão de geradores síncronos, Dissertação de Mestrado, DEE/CCT/UFPB, 1984.

- MAWDSLEY's LTD., Specification no. 103/R13 of Electrical Equipment for the Microsynchronous Generator set Dursley glos, September, 1975.
- MOTA, W.S., Simulação dinâmica de sistemas de potência, apostila do curso de pós-graduação em Eng. Elétrica, CCT/DEE/UFPB, 1986.
- RANKING, A. W., Per unit impedance of synchronous machines, Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs., 1945, 64, pp. 569-573.
- ROBERT M.R., Micro machine and micronetwork study of the problems of transient stability by use of models similar electromechanically to existing machines and systems, GIGRE, Paris, 1950, paper 338.
- SHEARD, G. & EVANS, F.J., A Special-purpose pulsewidth-modulated exciter and the time-constant modifications of alternators, IEEE Trans. on Ind. Elect. and Control Inst. Vol. IECI-18, No. 2, May 1971
- VENIKOV, V.A., and Ivanov Smolenskii, A.V., Development of physical model for electrical systems, *ibid*, (8), pp.1-10, 1955.
- WOOLDRIDGE A.B. & BLYTHE A.L., Considerations affecting the design philosophy of solid-state exciters, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No. 5, May 1968, 1288-1299 p.