

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

FELIPE BARROS DANTAS

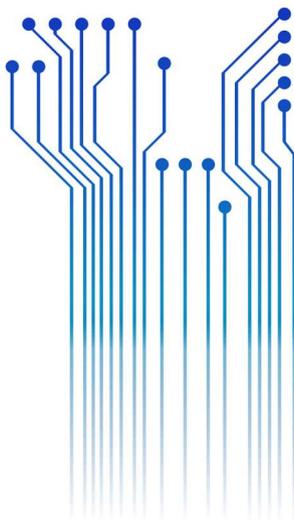


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
SUBESTAÇÕES HÍBRIDAS E CONVENCIONAIS



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2017

FELIPE BARROS DANTAS

SUBESTAÇÕES HÍBRIDAS E CONVENCIONAIS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Orientador

Campina Grande
2017

FELIPE BARROS DANTAS

SUBESTAÇÕES HÍBRIDAS E CONVENCIONAIS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em ____ / ____ / _____

Professor Ronimack Trajano de Souza, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, Isabele e Adilson, que sempre me ensinaram que educação é a única coisa que ninguém pode tirar de mim, e a Camila, minha namorada, que sempre esteve ao meu lado durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me fazer seguir em frente, e que está possibilitando a conclusão do curso.

Agradeço também à minha mãe, Isabele, e ao meu pai, Adilsom, por terem me proporcionado uma boa educação, por terem alimentado tanto meu corpo quanto meu espírito. Possibilitando assim, a finalização de mais uma jornada em minha vida.

Agradeço também à toda minha família, que me apoiaram durante o decorrer da minha vida, com carinho e suporte para que eu pudesse superar cada dificuldade que encontrei.

Agradeço também à Camila, minha namorada, que sempre esteve ao meu lado em vários momentos difíceis e felizes dessa minha longa jornada.

Agradeço também à Fábio Nepomuceno e à Paulo Coutinho, engenheiros da Chesf, que foram de grande importância na realização desse trabalho.

Agradeço também à Célio Anésio, professor do curso de engenharia elétrica, que apresenta maior influência em minha vida, tanto profissional quanto pessoal. Profissional no qual me espelho e tanto admiro.

Agradeço também à Ronimack Trajano, professor do curso de engenharia elétrica, que tão prontamente se dispôs a participar da minha banca e trouxe boas ideias para a elaboração desse trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“Você pode fazer a diferença.
Por vezes não será grandioso
E pode até nem ser visível.
Mas será igualmente valioso!”*

James Gordon.

RESUMO

Este trabalho visa abordar de maneira geral o estado da arte das subestações híbridas quando comparadas com as subestações convencionais, no que diz respeito aos avanços tecnológicos, ao projeto, à manutenção e à operação das subestações. Devido ao crescente aumento da demanda nos grandes centros urbanos e a supervalorização das áreas próximas desses grandes centros de carga tornou-se necessário desenvolver novas tecnologias para atender à crescente demanda de maneira eficaz e eficiente, ocupando uma área menor e com maior confiabilidade. Dessa forma, foram desenvolvidas as subestações híbridas, que são mais confiáveis e ocupam áreas até 70% menores que as subestações convencionais, além de possibilitar a instalação no meio dos grandes centros de carga, já que não apresentam risco de explosão. De maneira generalizada, as subestações híbridas são excelentes opções reais para atender à crescente demanda nos grandes centros de carga, ocupando áreas mais restritas e possuindo um tempo de comissionamento e construção bem menor em relação às subestações convencionais, mas sem implicar em custos significativos para o projeto, para a operação e para a manutenção.

Palavras-chave: Subestações Híbridas, AIS, HIS.

ABSTRACT

This report aims to approach in general the state of the art of the hybrid substations when compared with the conventional substations, with respect to the technological advances, the design, the maintenance and the operation of the substations. Due to the increasing demand in large urban centers and the overvaluation of areas close to these large load centers, it has become necessary to develop new Technologies to meet growing demand efficiently, occupying a smaller area and being more reliable. In this way, hybrid substations were developed, which are more reliable and occupy areas up to 70% smaller than conventional substation, and can be installed in the middle of large load centers, since they don't present a risk of explosion. In a general way, hybrid substations are excellent real options to meet the growing demand in large load centers, occupy more restricted areas and have a much shorter commissioning and construction time compared to conventional substations, but without incurring significant costs for the project, operation and maintenance.

Keywords: Hybrid substation, AIS, HIS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Vista lateral de uma subestação convencional.....	18
Figura 2: Para-raios de porcelana de 230 kV.....	19
Figura 3: Chave seccionadora de 230 kV.....	20
Figura 4: Transformador de potencial de 230 kV.....	20
Figura 5: Transformador de corrente de 230 kV.....	21
Figura 6: Disjuntor PVO de 230 kV.....	22
Figura 7: Transformador de potência de 230/69 kV.....	22
Figura 8: Resistor de aterramento.....	23
Figura 9: Banco de Autoboost em estrutura simples de poste.....	24
Figura 10: Banco de capacitores em montagem horizontal.....	24
Figura 11: Regulador de tensão de 32 degraus.....	25
Figura 12: Compensador síncrono rotativo.....	26
Figura 13: Comparação entre áreas ocupadas - HIS x AIS.....	27
Figura 14: Subestação Rondissone de 400 kV, em Terna, na Itália.....	28
Figura 15: Esboço da subestação Meeden de 400 kV, abrigada, em Tennet, na Alemanha.....	28
Figura 16: Subestação Meeden de 400 kV, abrigada, em Tennet, na Alemanha.....	28
Figura 17: Transformador isolado a gás abrigado, haymarket, Austrália.....	29
Figura 18: Transformador isolado a gás externo de 400 kV e 2750 MVA.....	29
Figura 19: Coolers externos para TIG de 400 kV e 2750 MVA.....	30
Figura 20: Linha isolada a gás.....	30
Figura 21: Cabo supercondutor - subestação bixby, USA.....	32
Figura 22: Disjuntor Isolado a gás.....	33
Figura 23: Transdutor de corrente – bobina de Rogawski.....	33
Figura 24: Transdutor capacitivo de tensão.....	34
Figura 25: PASS da ABB para tensões 72,5 a 100 kV.....	35
Figura 26: Esquema de um PASS de 72,5 a 100 kV.....	36
Figura 27: PASS de 100 kV com barramento duplo, em Norway.....	37
Figura 28: Visão geral da arquitetura do IEC 61850.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIS	Air Insulated Substation
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGRÉ	Conselho Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
CO ₂	Dióxido de Carbono
GIL	Gas Insulated Line
GIS	Gas Insulated Substation
GPS	Global Position System
GVO	Grande Volume de Óleo
HIS	Hybrid Insulated Substation
IA	Inteligência Artificial
IED	Intelligent Electronic Device
LAN	Local Area Network
NOS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PASS	Plug And Switch System
PCH	Pequena Central Hidroelétrica
PVO	Pequeno Volume de Óleo
SAGE	Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TIG	Transformador Isolado a Gás
TP	Transformador de Potencial

SUMÁRIO

1	Introdução.....	12
1.1	Objetivos.....	14
	Objetivo Geral.....	14
	Objetivos Específicos.....	14
1.2	Motivação.....	14
1.3	Estrutura do trabalho.....	15
2	Subestações Convencionais.....	16
3	Subestações híbridas.....	27
4	Considerações finais.....	40
	Referências.....	41
	Glossário.....	43

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda de energia elétrica devido a uma série de fatores que vão desde o aumento populacional em conjunto com o crescimento das redes de distribuição que abrangem um maior número de usuários, até o aprimoramento de tecnologias que produzem equipamentos mais avançados e que modificam o estilo de vida das pessoas, pois as rotinas estão se tornando cada vez mais dinâmicas e dependentes de aparelhos digitais, o que caracteriza um maior consumo de energia elétrica. No entanto, não é apenas necessário gerar energia elétrica, também é preciso distribuí-la, ou seja, levá-la até os centros consumidores.

Devido ao êxodo rural e ao crescimento populacional, nos grandes centros urbanos ocorre uma supervalorização nos preços das áreas próximas aos grandes centros de carga, fazendo com que seja necessário a construção de subestações mais compactas. Nesse contexto surgem as subestações híbridas, que ocupam menos espaço e são mais seguras. Possibilitando, assim, a construção de subestações de distribuição em grandes centros urbanos.

Uma das soluções para a crescente demanda é a geração distribuída e renovável, que vai desde microgeração residencial até os parques eólicos e solares. Podendo assumir muitas formas, tais como energia eólica, fotovoltaica, Pequena Central Hidroelétrica (PCH), entre outras. A natureza da tecnologia de geração, os níveis de tensão e a localização criarão diferentes condições para operar o Sistema elétrico de Potência (SEP). A preferência por locais de geração remota introduz muitos problemas do sistema, tais como a natureza da transmissão para os centros de carga e na prestação de serviços e manutenção, que determinarão o tipo de solução necessária.

Embora o aumento do uso de geração distribuída possa aliviar os problemas do controle de tensão dentro do Sistema Interligado Nacional (SIN), a geração remota irá exigir compensação reativa adicional para permitir a transmissão de energia elétrica para os centros de cargas. Também é necessário realizar o monitoramento da geração distribuída para que seja possível gerenciar o funcionamento da rede, especialmente quando há contingências num sistema estressado. Inevitavelmente, a maioria destes

sistemas incorporam elementos provenientes da eletrônica de potência para interagir com o sistema de energia já existente.

O ritmo da evolução tecnológica, particularmente em sistemas secundários nas subestações, irá exigir novas habilidades ao engenheiro de proteção. A telecomunicação, por exemplo, vem provocando mudanças às tecnologias de automação, proteção e no monitoramento. Os projetos das subestações terão que acompanhar e se adaptar a essas e outras mudanças. Além disso, a terceirização também exerce forte influência na manutenção, uma vez que a falta de conhecimento interno por parte da terceirizada não garante a devida execução do serviço, podendo acarretar em resultados ineficazes.

Já o gerenciamento de interrupção possui forte impacto na operação de uma subestação, pois as interrupções em subestações tendem a sofrer multas quando ultrapassa-se um determinado limite de tempo, para evitar isso deve-se haver um excelente planejamento do sistema que se deseja interromper, tanto para manutenção, quanto para a construção. Para isso, engenheiros utilizam diferentes estratégias de manutenção para que seja possível adequar as manutenções com os requisitos do sistema. O que levanta a questão de como pode-se acelerar a construção, a substituição ou a manutenção, ao mesmo tempo que se tem que manter as interrupções no menor espaço de tempo possível, sem incorrer em custos adicionais e significativos ao projeto ou a operação.

1.1 OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é fazer o comparativo entre subestações convencionais e subestações híbridas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho de conclusão de curso tem por objetivos específicos:

- i. Explicar as dificuldades encontradas no projeto, operação e manutenção de subestações;
- ii. Avaliar o estado da arte das subestações;
- iii. Abordar sobre tecnologias empregadas atualmente nas subestações.

1.2 MOTIVAÇÃO

Neste trabalho pretende-se apresentar o estado da arte das subestações híbridas comparadas com as subestações convencionais. As subestações híbridas são provenientes de avanços tecnológicos e da necessidade de expandir ou construir em áreas restritas. Também serão abordados os problemas enfrentados no projeto, na operação e na manutenção das subestações, assim como das soluções que são atualmente utilizadas para superar as dificuldades impostas.

Outro motivo foi a não abordagem desse conteúdo tão interessante e atual durante a graduação. Nosso curso possui uma alta carga horária, que é proveniente dos diversos conhecimentos que são necessários para nossa formação, mas que infelizmente não se mostra tão atual quanto desejaríamos.

A realização desse trabalho só foi possível graças a uma visita técnica realizada a CHESF em Recife, Pernambuco, que foi organizada pelo Professor Célio.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso está dividido em 4 seções. Na primeira seção, fez-se a introdução, citando algumas dificuldades que a crescente demanda de energia elétrica vem apresentando nos grandes centros urbanos ultimamente. Posteriormente, na segunda seção, são abordadas as características das subestações convencionais, tais como os equipamentos que a compõem e a utilização destes, além de algumas soluções para os problemas atuais sobre a crescente demanda. Em seguida, na terceira seção, é desenvolvido o assunto referente às subestações híbridas e algumas das tecnologias que são necessárias para sua implementação. O trabalho é finalizado na quarta seção, com apresentação das considerações finais e com o encaminhamento para propostas de refinamentos para pesquisas similares posteriores.

2 SUBESTAÇÕES CONVENCIONAIS

Tem-se nesta seção um pouco sobre as subestações convencionais e logo em seguida a seção referente a subestações híbridas e um pouco sobre a tecnologia que foi utilizada para a criação delas.

As subestações de distribuição são responsáveis pela recepção da energia elétrica proveniente de redes de subtransmissão em alta tensão e pela conversão do nível de tensão a valores caracterizados como média tensão. No entanto, para se construir uma subestação devemos levar em consideração alguns pontos, como os fatores ambientais, a crescente demanda de energia elétrica, a geração de maneira distribuída e renovável, a manutenção, a operação e a substituição ou remodelagem da subestação.

Como dito anteriormente, as mudanças climáticas devem ser levadas em consideração na hora de projetar uma subestação, pois as mudanças climáticas têm trazido efeitos significantes para subestações, tanto a nível físico quanto operativo devido à grande ocorrência de desastres naturais. Os campos verdes trazem restrições relativas as áreas das subestações, fazendo com que expansões sejam feitas no espaço já ocupado. Embora a segurança seja primordial, temos que considerar a operação e manutenção da subestação. Adicionado a isso temos o crescente impacto visual ao local onde a subestação está localizada.

Outro ponto muito importante é a crescente demanda, pois o mercado de energia requer a revisão da arquitetura das redes para tornar o sistema o mais flexível possível. A falta de estratégias de gestão a longo prazo dentro da organização irá representar uma ameaça à confiabilidade e segurança dos ativos, especialmente porque os investidores preferem ganhos a curto prazo, quando comparado com a vida útil da aparelhagem. As restrições impostas pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) indicam que a tarefa de fornecer energia ininterruptamente está cada vez mais difícil. Portanto, qualquer nova prática ou manutenção de peças dos equipamentos precisa ser eficiente em relação às interrupções. Alguns países estão enfrentando restrições de recursos os quais afetam o custo e o prazo para a construção de novos projetos.

A composição dos perfis de carga diária e sazonal vêm mudando, refletindo o impacto de novas tecnologias de consumo (como cargas de ar condicionado, motores e

fontes de alimentação). O que demonstra uma mudança nos padrões sociais e culturais como o estilo de vida “24-horas” espalhado pelo mundo. A longo prazo, a maior utilização da energia renovável poderá dar maior prioridade aos carros elétricos e aos transportes públicos, especialmente se os países tentarem atingir a meta de redução de Dióxido de Carbono (CO₂).

Outro desafio a ser enfrentado é a operação das subestações. A fase de operação de uma subestação inicia-se após a construção e o comissionamento da mesma. A operação é provavelmente a fase que envolve a maior incerteza, uma vez que dura por décadas. A manutenção e o gerenciamento de interrupções são fatores de fundamental importância para garantir a disponibilidade e a vida útil do circuito, a maneira como são feitas afeta diretamente a confiabilidade e vida útil dos equipamentos. Portanto, a manutenção é de suma importância para as subestações.

As subestações mais antigas apresentam uma complexidade adicional no momento da manutenção, pois possuem diversas gerações de equipamentos dentro delas. Utilizar os mesmos princípios de operação e manutenção para tudo não é uma forma viável de agir, tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista econômico. As tentativas de reduzir os custos operacionais dentro das subestações têm forçado o desenvolvimento de novas estratégias. Entretanto, mão de obra experiente é necessária para a implementação dessa estratégia.

Outro fator que deve ser levado em consideração no projeto de uma subestação é o tempo de vida atribuído a um equipamento. O tempo de vida útil apresenta variações drásticas em relação aos equipamentos atuais e os equipamentos com mais de 50 anos em relação à planta primária, o que justifica a substituição de alguns equipamentos primários antigos por modelos mais atuais. Os sistemas secundários são mais complexos, com períodos de vida útil mais curtos, como microprocessadores, que duram em média de 5 a 6 anos, enquanto relés, caixas de controle e aparelhos de telecomunicação duram pelo menos 15 anos. É preciso determinar uma vida útil econômica para os sistemas secundários, que deve levar em conta a remodelagem e a disponibilidade das peças sobressalentes antes que o equipamento se torne obsoleto ou inatingível.

Por outro lado, o equipamento primário ainda deve durar muito mais tempo (por volta de 40 anos), embora os transformadores de potência possuam uma vida útil mais longa. Uma consideração fundamental no início é gerenciar as interfaces eletrônicas com os equipamentos e estabelecer a vida econômica global, uma vez que a vida útil

dos equipamentos não coincide e os equipamentos do sistema secundário precisarão ser remodelados em algum momento da vida útil dos equipamentos do sistema primário. Também deve-se levar em consideração o impacto causado pela falha do equipamento que pode representar riscos significativos para a saúde, segurança e estabilidade do sistema ou para os operadores da subestação, além de quaisquer sanções financeiras por perda do fornecimento de energia elétrica. A falta de coordenação dos equipamentos na subestação também pode resultar em perturbações significativas no fornecimento de energia, na segurança e na confiabilidade do serviço prestado.

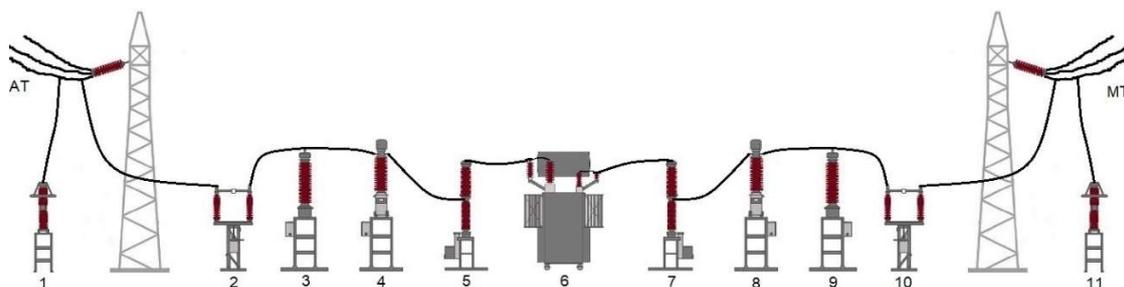
O desenvolvimento constante do sistema e de programas de ativos, aliados a uma mudança no gerenciamento da geração, pressionarão cada vez mais a disponibilidade e a confiabilidade do sistema.

No que diz respeito a geração distribuída e renovável sabemos que a geração normalmente é focada em fontes primárias de combustível, como terminais de gás, represas, campos de carvão, entre outros. A energia eólica e a energia solar estão como soluções renováveis para a crise hídrica que o país passa no momento. A maioria das gerações eólicas e solares são dispersas, ou seja, próximas as cargas consumidoras. Diferente das hidroelétricas, que são alocadas distantes dos consumidores.

Existem incentivos para a instalação de fontes “mais ecológicas”, o que dificultará o trabalho de gerenciar o sistema, devido a proliferação sem controle e sem coordenação da segurança desses sistemas a longo prazo, além de provocar uma maior mistura entre sistemas de Corrente Alternada (CA) e de Corrente Contínua (CC).

Os principais equipamentos de uma subestação de distribuição são vistos na Figura 1: os para-raios nº 1 e 11, as chaves seccionadoras nº 2 e 10, os transformadores de potencial nº 3 e 9, os transformadores de corrente nº 4 e 8, os disjuntores nº 5 e 7, e o transformador de potência nº 6. Lembrando que os equipamentos de nº 1 a 5 possuem níveis de tensão e corrente diferentes dos equipamentos de nº 7 a 11.

Figura 1: Vista lateral de uma subestação convencional.



Fonte: O próprio autor.

A proteção dos equipamentos elétricos contra descargas atmosféricas é feita através da utilização de para-raios, que pode ser visto na Figura 2 e que possuem propriedades não lineares devido aos elementos utilizados na fabricação para conduzir à terra a corrente de descarga associada às sobretensões induzidas na rede e em seguida interromper as correntes subsequentes.

Figura 2: Para-raios de porcelana de 230 kV.



Fonte: O próprio autor.

Já as chaves seccionadoras apresentadas na Figura 3, são equipamentos capazes de abrir ou fechar um circuito, quando o mesmo possui uma corrente de intensidade desprezível e não ocorrer variações significativas de tensão através dos terminais da chave. São usadas para manobrar circuitos, isolar um equipamento qualquer ou propiciar o *by-pass* de equipamentos. Algumas chaves seccionadoras podem ser operadas em carga, desde que não se trate da interrupção de uma corrente de curto circuito, essas chaves são chamadas de interruptores.

Figura 3: Chave seccionadora de 230 kV.



Fonte: O próprio autor.

O Transformador de Potencial (TP), ilustrado na Figura 4, é utilizado para suprir aparelhos de medição com alta impedância, tais como voltímetros, relés de tensão, etc. Eles possibilitam que os instrumentos de medição e proteção atuem de maneira adequada sem a necessidade de possuir tensão de isolamento de acordo com a rede a qual estão ligados.

Figura 4: Transformador de potencial de 230 kV.



Fonte: Fonte: Mamede Filho (2015).

Tal como o TP, o Transformador de Corrente (TC), é destinado para alimentar instrumentos de medição, no entanto, o TC alimenta instrumentos com baixa impedância elétrica, tais como amperímetros, relés, entre outros. Na Figura 5 apresenta-se uma foto de um TC.

Figura 5: Transformador de corrente de 230 kV.



Fonte: O próprio autor.

Dando continuidade, temos também os disjuntores, que são equipamentos aplicados na interrupção e no restabelecimento de correntes elétricas num determinado ponto do circuito. Tem como principal objetivo interromper as correntes de defeito (tal como curto-circuito) em um circuito no menor espaço de tempo possível. Vale destacar que o disjuntor deve sempre ser utilizado em conjunto com relés, os quais serão responsáveis por sua atuação na interrupção da corrente. Na Figura 6 tem-se a foto de um disjuntor.

Figura 6: Disjuntor PVO de 230 kV.



Fonte: O próprio autor.

O equipamento com o maior custo em uma subestação é o transformador de potência, que pode ser visto na Figura 7. Ele opera de forma estática e, através de indução eletromagnética, transfere a energia do primário para o secundário, mantendo a mesma frequência, mas com tensão e corrente diferentes. Além de possuir o lado de alta tensão isolado eletricamente do lado de baixa tensão.

Figura 7: Transformador de potência de 230/69 kV.

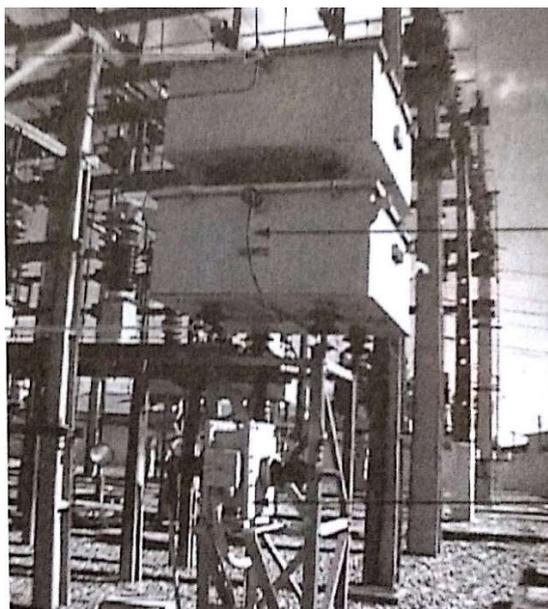


Fonte: O próprio autor.

As subestações de potência e as centrais geradoras de grande porte apresentam correntes de curto-circuito assimétricas com intensidades muito elevadas, o que acarreta em danos na instalação e perigo à vida dos operários. Para reduzir os custos e, ainda assim, manter a segurança dos operários, é preciso que as correntes de curto-circuito sejam reduzidas a níveis aceitáveis, principalmente no que se refere a faltas AT (Curto-circuito entre uma das fases e a terra). No caso de faltas AT, basta conectar os resistores de aterramento, que podem ser vistos na Figura 8, ao neutro do transformador ou dos geradores e a corrente de curto-circuito será limitada.

Vale destacar que há restrições quanto a sua instalação, podendo apenas ser utilizados em níveis de tensão de até 34,5 kV, e caso venham ficar expostas às intemperes, devem ser alocados em abrigos que possuam no mínimo uma classe de proteção IP54.

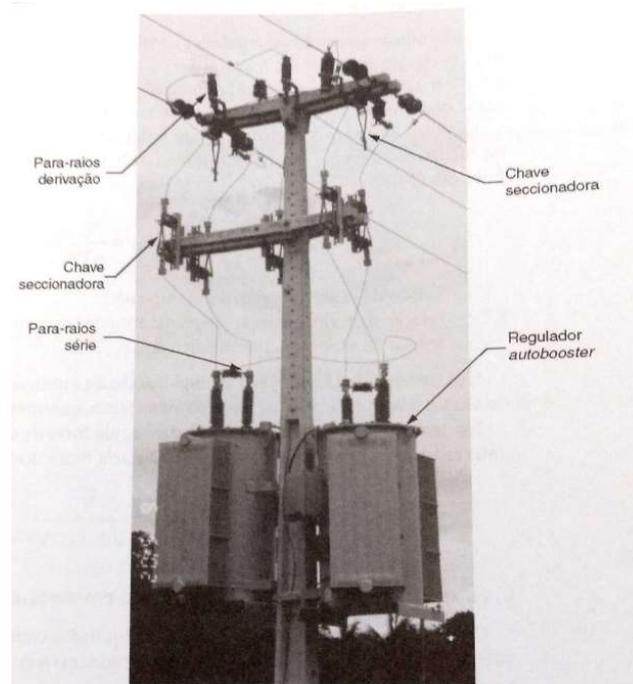
Figura 8: Resistor de aterramento.



Fonte: Mamede Filho (2015).

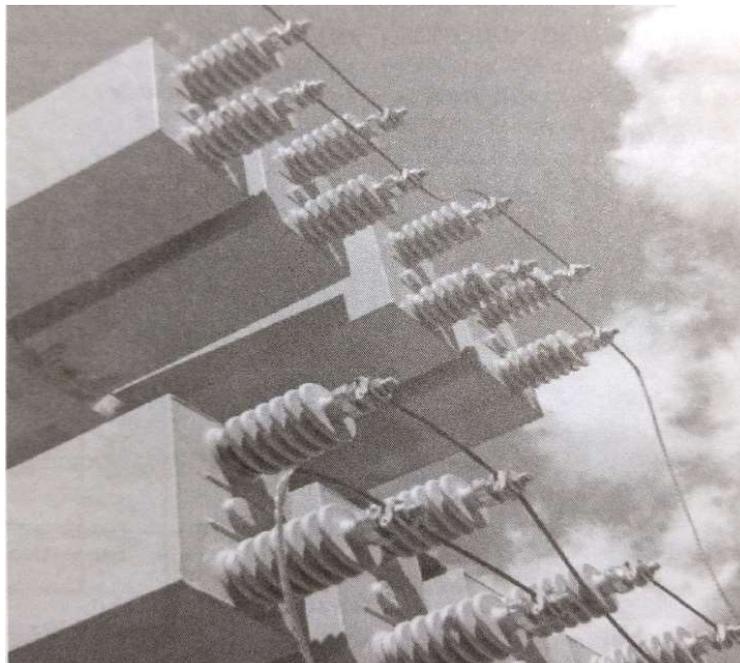
Devido às perdas e quedas de tensão durante a distribuição, é necessário utilizar reguladores de tensão. Eles são responsáveis por manter os níveis de tensão dentro dos padrões estabelecidos pela ANEEL. Para isso, são utilizados reguladores *autobooster*, bancos de capacitores fixos ou automáticos e reguladores de tensão de 32 degraus. Que são respectivamente ilustrados através das Figuras 9, 10 e 11.

Figura 9: Banco de *Autoboost* em estrutura simples de poste.



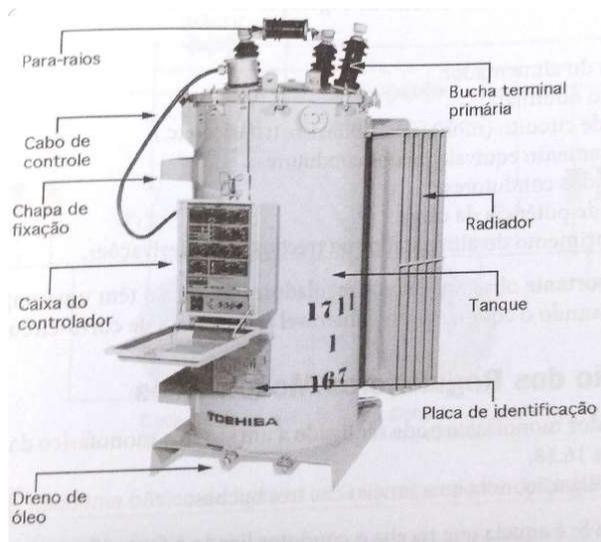
Fonte: Mamede Filho (2015).

Figura 10: Banco de capacitores em montagem horizontal.



Fonte: Mamede Filho (2015).

Figura 11: Regulador de tensão de 32 degraus.



Fonte: Mamede Filho (2015).

O controle de tensão é um campo muito extenso, atendendo tanto o estado estacionário quanto as condições do sistema dinâmico. A natureza variável da geração e sua localização terá um profundo impacto sobre o projeto da subestação que precisar alimentar a demanda de uma carga distante. Quando dispositivos de compensação de reativos forem utilizados em uma determinada área, será necessário um ajuste cuidadoso de controle dinâmico para garantir que não haverá uma resposta indesejada quando o sistema sofrer alguma perturbação. Normalmente, as medidas corretivas são posicionadas localmente no dispositivo que necessita de compensação e as aplicações mais avançadas, que utilizam um sofisticado sistema de controle, devem ser projetadas de maneira a neutralizar qualquer tipo de ressonância que possa vir a ocorrer.

O excesso de compensação de reativos pode acarretar num maior risco de ressonância na rede, pois equipamentos de baixa perda são projetados com baixa resistência, o que implica uma redução do amortecimento.

Normalmente, utiliza-se bancos de comutação mecânica há muitos anos para controlar os níveis de tensão no estado estacionário, porém a capacidade instalada está aumentando significativamente, já que as concessionárias não possuem a intenção de construir novas linhas ou expandir o sistema para corrigir os problemas de queda de tensão. Enquanto existe uma vasta utilização de compensadores estáticos, o mesmo não pode ser dito sobre compensadores dinâmicos. Levando em consideração que é necessário dar suporte a tensão de falha pós comutação rápida, para evitar a

instabilidade do sistema, e apenas os interruptores eletrônicos de energia podem responder nesse período.

Uma forma de realizar a compensação de reativos de forma dinâmica é utilizando um compensador síncrono, ilustrado na Figura 12, que tem como fundamental objetivo disponibilizar potência reativa sob variadas condições do sistema elétrico, a fim de controlar e estabilizar a tensão do sistema, também disponibiliza inércia e potência de curto-circuito, com o intuito de otimizar a transmissão, geração e estabilidade do sistema.

Figura 12: Compensador síncrono rotativo



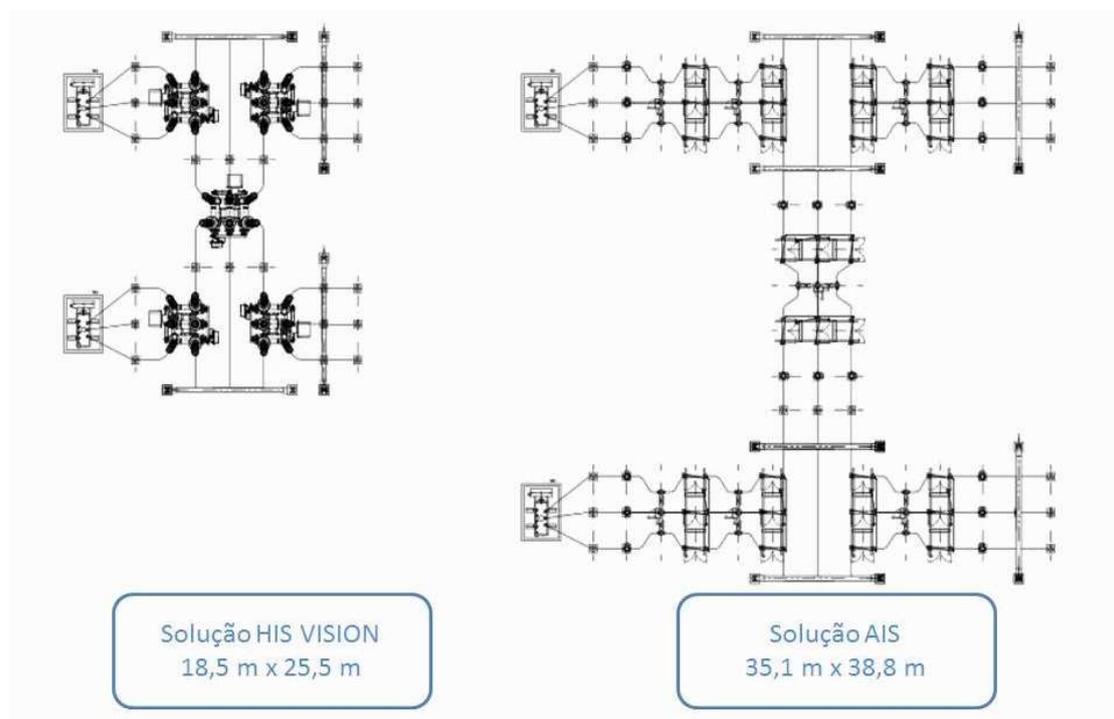
Fonte: Site oficial da WEG, compensadores síncronos rotativos.

Após a apresentação das subestações convencionais, dar-se-á continuidade ao trabalho seguindo para a próxima seção, que irá abordar sobre as subestações híbridas e um pouco das tecnologias que nela são utilizadas.

3 SUBESTAÇÕES HÍBRIDAS

As subestações híbridas são subestações que combinam as vantagens da GIS (subestação isolada a gás SF₆) com a simplicidade das subestações AIS (subestação isolada a ar). É uma solução mais confiável para novas instalações, ampliações ou até mesmo substituições de subestações já existentes. Devido à sua tecnologia e formato mais compacto, uma subestação híbrida apresenta uma redução na área ocupada em até 70% com relação a uma subestação convencional, como pode ser visto na Figura 13. Além disso, ainda possuem um baixo tempo de comissionamento, uma fácil instalação (como mostrada na Figura 14), podem ser facilmente abrigadas (como é esboçada na Figura 15 e ilustrada na Figura 16) e, em caso de expansão ou retrofit, possui economia de tempo e rápida instalação, além de apresentar uma baixa taxa de manutenção.

Figura 13: Comparação entre áreas ocupadas - HIS x AIS.



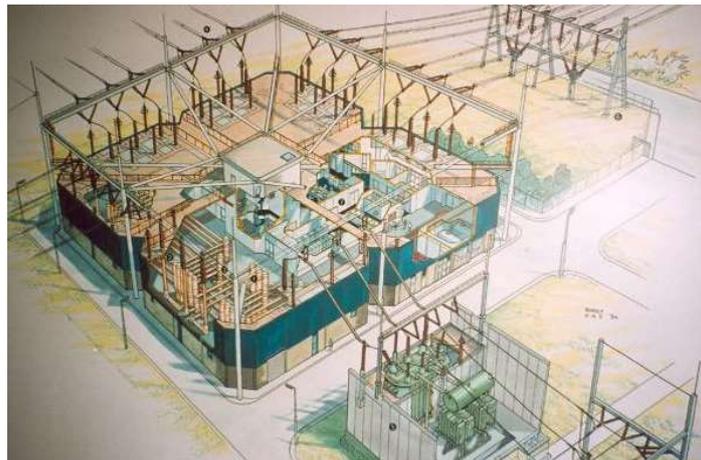
Fonte: Site oficial grupo VISION, soluções híbridas.

Figura 14: Subestação Rondissone de 400 kV, em Terna, na Itália



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

Figura 15: Esboço da subestação Meeden de 400 kV, abrigada, em Tennet, na Alemanha.



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

Figura 16: Subestação Meeden de 400 kV, abrigada, em Tennet, na Alemanha.



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

Elas foram criadas em resposta às dificuldades já descritas anteriormente. Junto a elas existem uma série de soluções baseadas em avanços tecnológicos, tais como equipamentos compactos, condutores de alta capacidade, transformadores isolados a gás (TIG), que seguem ilustrados nas Figuras 17 e 18, cabos supercondutores, controle do fluxo de potência, entre outros.

Figura 17: Transformador isolado a gás abrigado, haymarket, austrália.



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

Figura 18: Transformador isolado a gás externo de 400 kV e 2750 MVA.



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

Lembrando que, assim como os transformadores convencionais possuem ventilação forçada para aumentar o rendimento, os TIG também podem utilizar coolers para o mesmo propósito, como pode ser visto na Figura 19.

Figura 19: Coolers externos para TIG de 400 kV e 2750 MVA.



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

A tecnologia de GIL (*Gas Insulated Line*) é diferente da GIS tradicional em relação a construção e isolamento. A soldagem melhora a estanqueidade do gás e não há nenhuma necessidade de qualquer manutenção invasiva, fornecendo um condutor bastante robusto, como o mostrado na Figura 20. Utiliza-se uma mistura gasosa de SF₆ e Nitrogênio para isolar o condutor. Esse projeto permite a instalação de um sistema de condutores seguro de alta capacidade, dentro do limite da subestação. Também pode ser montado em superfície ou enterrado, assim os custos e riscos associados a mão de obra civil são reduzidos.

Figura 20: Linha isolada a gás.



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

A utilização de sistemas supercondutores em subestações vem sendo discutida há séculos, mas a exploração comercial e técnica é lenta, embora algumas aplicações em Mega Volts estejam em andamento. Embora a atração de baixa perda de condutores de alta corrente seja óbvia, integrar isso em redes existentes está revelando-se um desafio.

O impacto da falha do equipamento através do vazamento do criogênio, o efeito das falhas do sistema e o próprio sistema criogênico são de grande preocupação, especialmente em uma indústria na qual o orçamento da manutenção está constantemente sob pressão para serem reduzidos. Como foi dito anteriormente, eles são utilizados com sucesso dentro dos limites da subestação.

Outra inovação tecnológica que possibilitou a criação das subestações híbridas foi o TIG, que é uma unidade compacta que pode ser instalada em um espaço confinado. Devido à ausência de óleo, o risco de incêndios é removido, dessa forma, ele pode ser alocado próximo de alojamentos públicos. Entretanto, é necessária uma grande quantidade de SF₆ (uma quantidade tão grande quanto a utilizada numa GIS propriamente dita) na construção do TIG, e os procedimentos de manuseamento do gás devem ser cuidadosamente considerados no que se refere a condições de falha ou manutenção.

A tecnologia vem avançando de maneira a tornar as aplicações dos equipamentos mais modulares, com baixa manutenção e com maior segurança. Isso inclui tentar reduzir o volume de SF₆ necessário para o isolamento e melhora da estanqueidade do gás. Na tentativa de otimizar a segurança e a restrição de espaço associada a novas construções ou substituições de ativos, os fabricantes estão tentando aumentar a confiabilidade através do uso de GIS altamente elaboradas para serem aplicadas em AIS, resultando assim, em subestações híbridas.

Embora seja muito menos susceptível a falhas e requer significativamente menos manutenção, o fornecimento de peças para a manutenção e as peças sobressalentes em caso de defeito deve ser organizado de maneira a minimizar a indisponibilidade, além disso, os distúrbios ocasionados na rede são mais críticos. Isso deve ser levado em conta na hora da aquisição e acordado com o fabricante ou divisão de suporte de engenharia no momento da compra do equipamento.

O avanço tecnológico proporcionou a criação e utilização de TC's óticos que utilizam o efeito Faraday e são integrados em disjuntores, para-raios integrados e disjuntores com instalações de desconexão integradas. Há muitas vantagens oferecidas através dos equipamentos compactos e integralizados que foram desenvolvidos nos

últimos anos. No entanto, os usuários precisam modificar seus procedimentos e sistemas para poder usufruir desses benefícios.

Como já citado anteriormente, alguns equipamentos possuem altas correntes de falta, o que pode ser resolvido através dos limitadores de corrente de falta. Esses dispositivos assumem muitas formas e podem ajudar os usuários a controlar os níveis de corrente de falta à medida que ele se desenvolve e se expande. Soluções mais simples incluem reatores. Projetos mais exóticos estão considerando supercondutores de alta temperatura, como o ilustrado na Figura 21, gatilhos de ressonância e eletrônica de potência. Todos possuem vantagens e desvantagens, mas cabe ao usuário identificar o que melhor se enquadra em sua necessidade. A confiabilidade do desempenho é, provavelmente, um dos requisitos mais importantes, uma vez que a falha no controle da corrente pode facilmente resultar em falha no equipamento ou até mesmo em perdas maiores. O que leva a pensar na automação da subestação.

Figura 21: Cabo supercondutor - subestação bixby, USA.



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

Os disjuntores utilizados nas HIS são ligeiramente diferentes dos disjuntores GVO e PVO, como o apresentado na Figura 22, eles apresentam isolamento a base de SF₆ e, na maioria dos casos, são alocados em conjunto com TC's óticos, transdutores de tensão e chaves seccionadoras.

Figura 22: Disjuntor Isolado a gás.



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

Os transdutores de corrente não são tão diferentes dos TC's convencionais, no entanto, apresentam um isolamento eletrônico entre o primário e o secundário, fornecendo uma maior segurança e um acoplamento de baixa potência. A abordagem mais comum é a utilização de uma bobina de Rogawski, que é ilustradas na Figura 23.

Figura 23: Transdutor de corrente – bobina de Rogawski.



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

Esse tipo de isolamento caracteriza um avanço significativo, uma vez que remove um dos principais perigos associados com às condições de circuito aberto no secundário e o risco de *flashover*. O transdutor fornece uma tensão proporcional à corrente que flui no primário e possui uma sensibilidade de alta resolução, uma vez que for calibrado.

Eles possuem uma vida útil em torno de 20 a 30 anos. Devido aos avanços tecnológicos, e a novos meios de proteção, os transdutores possuem uma auto supervisão

e devem ser substituídos em caso de falha. A única manutenção ocorre durante a calibração e na troca em caso de falha.

Por serem menores e menos intrusivos, as obras civis são reduzidas, uma vez que o número de fundações para a subestação será menor. As unidades que são integradas nas GIS removerão completamente a necessidade de um TC convencional. Além disso, o cabeamento secundário é substancialmente reduzido. Pois, na maioria dos casos, o caminho de comunicação para a proteção será feito através de fibra ótica, de modo que todos os problemas de indução eletromagnética serão eliminados, reduzindo significativamente os erros na medição.

Também existem TP's compactos. Os transdutores óticos utilizam técnicas de medição de campo elétrico que podem compensar várias perturbações. A técnica mais utilizada pelos transdutores de tensão é a utilização de um divisor capacitivo (que é ilustrado na Figura 24), assim como em alguns TP's convencionais. Como a maioria dos projetos não possuem indutância no secundário, então o sistema torna-se imune a efeitos de ferro ressonância.

Figura 24: Transdutor capacitivo de tensão.



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

Assim como os transdutores de corrente, os transdutores de tensão não possuem manutenção além da calibração. Eles também removem os perigos de circuito aberto do secundário. Além de ocuparem um espaço 50% menor em comparação com as soluções tradicionais.

A interface tradicional dos transformadores de instrumentos e proteção são completamente revisados, a saída do transdutor alimenta uma unidade de mesclagem que fornece um processamento de sinal com carimbo de horário. E, em seguida, alimenta os relés de proteção que estão conectados na rede LAN da subestação, fornecendo assim, métodos mais rápidos e flexíveis para conectar-se a proteção digital.

Outro exemplo do avanço tecnológico são os módulos de manobra híbridos compactos de alta tensão. Eles possuem uma rápida instalação, comissionamento e energização, podendo estar completamente operacionais em até 12 horas. Esses módulos são denominados de PASS (*Plug And Switch System*), eles incluem todas as funções de um bay completo de alta tensão em um único módulo, e pode ser visto na Figura 25.

Figura 25: PASS da ABB para tensões 72,5 a 100 kV.

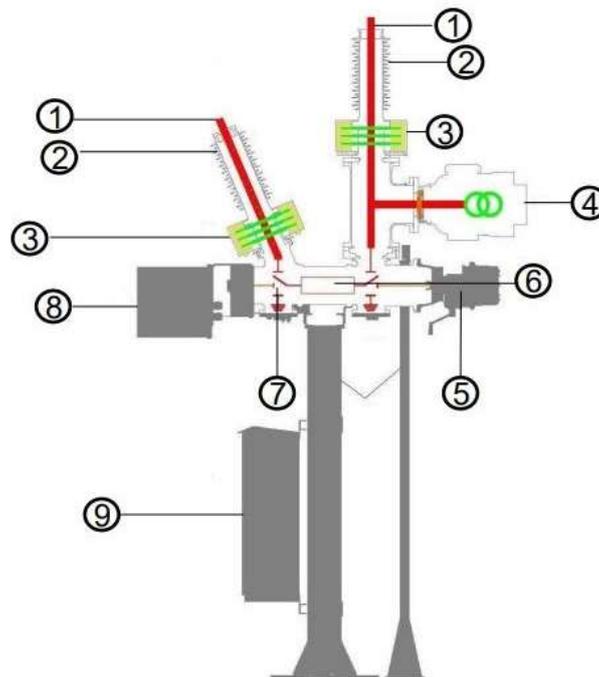


Fonte: Site oficial ABB – produtos de alta tensão – módulos híbridos.

O PASS incorpora em um único módulo monofásico e isolado a gás os seguintes equipamentos: disjuntor, seccionadoras com chaves de aterramento, transformador de potencial, transformador de corrente, chave rápida de aterramento, para-raios e, em alguns casos, conexão para cabos isolados. Os módulos são montados e testados na fábrica, ou seja, eles saem da fábrica prontos para uso.

Mais detalhes sobre o PASS podem ser vistos na Figura 26.

Figura 26: Esquema de um PASS de 72,5 a 100 kV.



Fonte: PASS portfólio – presentation, da ABB.

- 1 - Conexão de Alta tensão.
- 2 - Buchas.
- 3 - Transformador de corrente.
- 4 - Transformador de potencial isolado a SF₆ do tipo indutivo.
- 5 - Mecanismo de operação.
- 6 - Disjuntor.
- 7 - Chave terra.
- 8 - Mecanismo de operação de disjuntor.
- 9 - Cubículo de controle.

E além dessas características, o PASS ainda possui um controle de densidade do gás e a capacidade de detectar vazamento. Também possui um alívio de sobre pressões que protege o PASS contra o excesso de pressão e libera o excesso do gás. E, ainda, pode ser facilmente transportado sem a necessidade da utilização de nenhum tipo de transporte específico.

Para ter-se uma melhor noção das dimensões desse PASS basta ver a Figura 27, que ilustra um PASS com barramento duplo e dois operadores próximos a ele.

Figura 27: PASS de 100 kV com barramento duplo, em Norway.

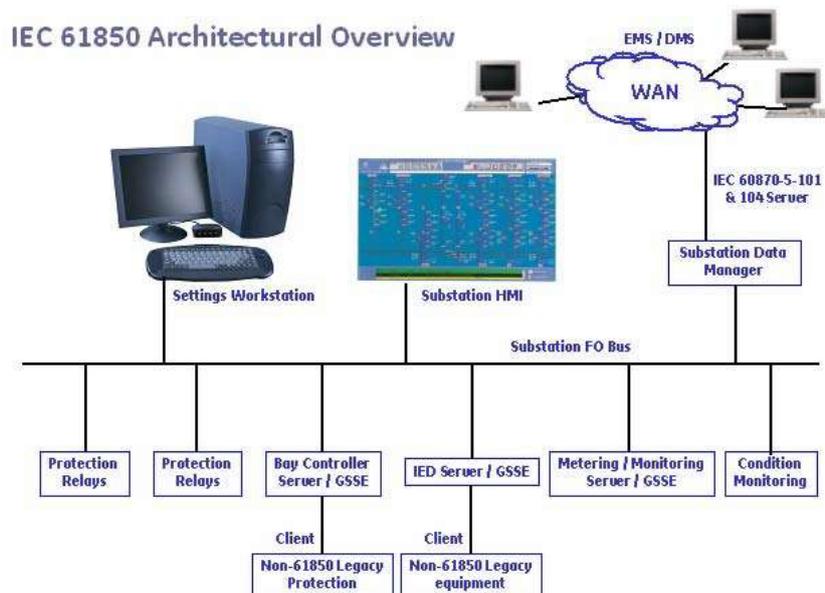


Fonte: PASS portfólio – presentation, da ABB.

Ao contrário dos equipamentos onde a indústria da energia controla o ritmo de evolução, a automação da subestação será determinada por outras indústrias. O que resulta em uma rápida obsolescência e problemas com os fornecedores, os quais fornecem aplicações consistentes. Os fabricantes estão colocando mais funcionalidades em IED (*Intelligent Electronic Device*) microprocessados, que crescem em capacidade e poder de processamento, semelhante aos computadores domésticos. O que força o engenheiro de proteção a desenvolver habilidades de programação para compreender e utilizar os sistemas modernos.

Embora a automação de subestações esteja mudando, em resposta ao rápido ritmo de desenvolvimento do protocolo de comunicação da subestação IEC 61850, será provavelmente, o elemento mais complexo visto na subestação por um longo tempo. A sua aplicação permitirá que o sistema se comunique de forma clara entre diferentes IED's e um maior intercâmbio de informações sobre equipamentos será possível, acessível às partes interessadas através da internet, como pode ser visto através do esquema da Figura 28.

Figura 28: Visão geral da arquitetura do IEC 61850.



Fonte: The impact of new functionalities on substation design, CIGRÉ.

Há também alguns inconvenientes com essa mudança: os equipamentos secundários de comunicação estão tornando-se obsoletos mais rapidamente (no que diz respeito a uma perspectiva de utilidade), informação e segurança cibernética e maior confiança na automação, onde sistemas que utilizam redes neurais ou tecnologias de IA (Inteligência Artificial) se adaptam às necessidades do sistema em constante mudança.

A medição do fasor, o rastreamento por GPS (*Global Position System*) e a rápida transferência de dados permitem a implementação de uma ampla área de proteção e controle, a fim de evitar a instabilidade do sistema, evitando assim possíveis apagões que possam vir a acontecer.

É interessante, também, obter controle sobre o fluxo de potência. Esse controle é feito através do sistema de transmissão CA flexíveis, os quais são referidos como dispositivos capazes de controlar a potência em um circuito ou subestação. A maioria dos desenvolvimentos recentes são baseados em arquiteturas de eletrônica de potência. Porém, algumas características também podem ser alcançadas com aplicações eletromagnéticas.

A eletrônica de potência baseada em compensadores seria como o compensador série controlado por tiristor, fornecendo uma impedância controlável, utilizada suavemente para compensar linhas e atenuar ressonâncias subsíncrona. O compensador estático série síncrono permite o controle através de uma tensão injetada.

O controle do fluxo de potência ativa e reativa independente pode ser fornecido pelo controlador de fluxo de potência interlinha e pelo controlador de fluxo de potência unificado. E para finalizar, o compensador estático conversível combina todas as funcionalidades do STATCOM e dos dispositivos citados anteriormente.

Através do desenvolvimento da tecnologia de sensores, há a capacidade crescente de monitorar quaisquer atividades na subestação. Muitas empresas de serviços públicos enfrentam o dilema de substituir ou complementar regimes tradicionais de manutenção com esses sistemas. Há desafios significativos para a integração desses sistemas nas ferramentas de tomada de decisão e na confiabilidade do próprio sistema de monitoramento. Os usuários precisam compreender o valor do monitoramento em tempo real de condições e como ele será usado.

Com base em todo o conteúdo que foi abordado até o presente momento, foi possível elaborar uma conclusão, o qual se encontra na próxima seção.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos problemas que foram apresentados, tais como acelerar a construção das subestações, realizar a substituição de equipamentos ou até mesmo de subestações inteiras, as subestações híbridas mostram-se excelentes opções para superar as atuais dificuldades impostas, tornando-se opções viáveis para atender à crescente demanda nos grandes centros de carga, sem a necessidade de grandes áreas e sem oferecer risco às pessoas ou a estruturas que estejam próximas, uma vez que não apresentam risco de explosão, além de não incorrer em custos adicionais e significativos para o projeto e a operação da subestação.

As disciplinas de Operação e Controle de Sistemas Elétricos, Proteção de Sistemas Elétricos, Equipamentos Elétricos e Análise de Sistemas Elétricos, que foram ministradas respectivamente pelos professores Célio Anésio, Chagas Guerra, Edson Guedes e Washington Neves, foram de fundamental importância para que este trabalho pudesse ser feito.

Para trabalhos futuros, seria interessante realizar um comparativo mais específico ou até mesmo um possível estudo de caso, o qual pudesse ser analisado através de tabelas ou gráficos os custos financeiros de implementação de uma subestação convencional e uma subestação híbrida, mostrando os custos de projeto e de operação a curto e longo prazo, além de apresentar qual modelo de subestação seria mais viável e o motivo da escolha.

Também sugiro a realização de um trabalho sobre o Sistema de Aberto de Gerenciamento de Energia (SAGE), desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) em parceria com a Siemens.

REFERÊNCIAS

- ABB, 2017. *Módulo híbrido PASS*. [Online]
Available at: http://new.abb.com/high-voltage/pt/modulo-hibrido/modules/pass_m00
[Acesso em 2017].
- ABB, s.d. *PASS Family*. [Online]
Available at: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2GJA708398&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- ABB, s.d. *PASS Portfolio presentation*. [Online]
Available at: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2GJA708520%202008.08&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- ABNT, 2002. *NBR 10520 - Informação e documentação - Citações em documentos - Apresentação*. s.l., ABNT, p. 7.
- ABNT, 2002. *NBR 6023 - Informação e documentação - Referências - Elaboração*. s.l., ABNT, p. 24.
- ABNT, 2003. *NBR 6028 - Informação e documentação - Resumo - Apresentação*. s.l., Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 2.
- ABNT, 2005. *NBR 6034 - Informação e documentação - Índice - Apresentação*. s.l., ABNT, p. 4.
- ABNT, 2011. *NBR 14724 - Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação*. s.l., ABNT, p. 11.
- AES Eletropaulo, 2008. *Aplicação de Tecnologia Híbrida em Subestação Compacta Abrigada*. Olinda(PE): s.n.
- FERREIRA, T. V., 2011. *Estimação Inteligente da Poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos Veces do Ruído Ultrassônico*, Campina Grande: s.n.
- Filho, J. M., s.d. *Manual de Equipamentos Elétricos*. s.l.:LTC.
- Grupo WEG, s.d. *WEG*. [Online]
Available at: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Compensadores-S%C3%ADncronos/Compensadores-S%C3%ADncronos/p/MKT_WEM_SYN_CONDENSERS
- Inmetro, 2010. *Unidades Legais de Medida*. [Online]
Available at: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/unidLegaisMed.asp?iacao=imprimir>
[Acesso em 12 08 2010].
- Muzy, G. L. C. d. O., 2012. *Subestações elétricas*. Rio de Janeiro: s.n.
- Sergio O. Frontin, 2013. *EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO. Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas*. Brasília: s.n.

VISION, s.d. *Subestação Híbrida*, Nova Lima: s.n.

Working Group B3.01, 2009. *THE IMPACT OF NEW FUNCTIONALITIES ON SUBSTATION DESIGN*: CIGRÉ. s.l.:s.n.

Working Group B3.20, 2009. *EVALUATION OF DIFFERENT SWITCHGEAR TECHNOLOGIES (AIS, MTS, GIS) FOR RATED VOLTAGES OF 52 V AND ABOVE*: CIGRÉ. s.l.:s.n.

Xavier, B. C., 2007. *Ampliação de uma subestação de 500 kV associada à expansão do sistema elétrico*. Rio de Janeiro(RJ): s.n.

GLOSSÁRIO

By-pass	É um termo derivado do inglês, que significa “desvio”.
Comissionamento	É o processo de assegurar que os sistemas e componentes de uma edificação ou unidade industrial estejam projetados, instalados, testados, operados e mantidos de acordo com as necessidades e requisitos operacionais do proprietário.
Corrente de Falta	Ocorre durante os curtos circuitos e é caracterizada pelo aumento súbito da corrente que passa por um circuito.
Efeito Faraday	É um fenômeno de polarização de luz através de reações entre a eletricidade e o magnetismo.
Estanqueidade	É a definição dada a um produto que é hermético, ou seja, está isento de furos, trincas ou porosidades que possam deixar sair ou entrar parte do seu conteúdo.
Ferro ressonância	É um fenômeno ressonante não linear que pode afetar redes de energia. É o aparecimento repentino de uma sobretensão muito alta e sustentada, com altos níveis de distorção harmônica, podendo causar danos nos equipamentos elétricos.
Flashover	É uma descarga disruptiva direta causada pela falha no isolamento.
IEC 61850	É a norma que padroniza os protocolos de comunicação entre os IED's.

IP54

Classe de proteção que indica proteção contra poeira, impedindo que a poeira possa comprometer o funcionamento do equipamento, e proteção contra jato de água dirigido direto para o aparelho.

Retrofit

É o termo utilizado na engenharia para designar um processo de modernização de um equipamento já considerado ultrapassado ou fora de norma.