v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA COM COMPENSADORES SÍNCRONOS: ASPECTOS OPERACIONAIS E CONTRIBUIÇÕES PARA A ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS

REACTIVE POWER COMPENSATION USING SYNCHRONOUS CONDENSERS: OPERATIONAL ASPECTS AND CONTRIBUTIONS TO POWER SYSTEM STABILITY

COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA CON COMPENSADORES SÍNCRONOS: ASPECTOS OPERATIVOS Y CONTRIBUCIONES A LA ESTABILIDAD DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Erivaldo Coutinho de Freitas Filho[1], Ronaldo Gomes Figueira[2]

e7119398
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9398

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise técnica da aplicação de compensadores síncronos em Sistemas Elétricos de Potência, com ênfase nos aspectos construtivos, operacionais e nos benefícios proporcionados à estabilidade e ao controle de tensão. O estudo aborda um compensador síncrono instalado em um sistema de transmissão de 525 kV, descrevendo seu princípio de funcionamento e os principais sistemas responsáveis por sua operação, incluindo excitação, regulação automática de tensão, refrigeração, distribuição de gases, lubrificação, injeção de óleo, conversor estático de frequência, proteção e supervisão. A metodologia baseia-se em revisão bibliográfica, análise técnica do equipamento e avaliação de dados operacionais relacionados à corrente e à tensão de excitação em função da potência reativa. Os resultados permitiram caracterizar a relação entre potência reativa, corrente de excitação e tensão de excitação em regime permanente. Os benefícios relacionados ao fortalecimento da rede elétrica, ao suporte de tensão e à estabilidade dos sistemas de potência são discutidos com base na literatura especializada. Conclui-se que os compensadores síncronos constituem uma solução estratégica para sistemas de transmissão de extra-alta tensão, especialmente diante da crescente inserção de fontes renováveis conectadas por conversores eletrônicos, contribuindo para a confiabilidade, segurança operativa e estabilidade do Sistema Interligado Nacional.

PALAVRAS-CHAVE: Compensador síncrono. Potência reativa. Controle de tensão. Sistema Elétrico de Potência. Sistema Interligado Nacional.

ABSTRACT

This work presents a technical analysis of the application of synchronous condensers in electric power systems, with an emphasis on their construction, operational aspects, and the benefits they provide for stability and voltage control. The study examines a synchronous condenser installed in a 525 kV transmission system, describing its operating principle and the key systems required for its operation—including excitation, automatic voltage regulation, cooling, gas distribution, lubrication, oil injection, static frequency conversion, protection, and supervision.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (UNIARA), com formação técnica em Eletroeletrônica.
[2] Docente do curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara (UNIARA), especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho com atuação em eletroeletrônica e sistemas de energia.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

The methodology is based on a literature review, a technical analysis of the equipment, and an evaluation of operational data concerning excitation current and voltage as a function of reactive power. The results characterize the relationship between reactive power, excitation current, and excitation voltage under steady-state conditions. The benefits—such as strengthening the electrical grid, providing voltage support, and enhancing power system stability—are discussed based on specialized literature. It is concluded that synchronous condensers represent a strategic solution for extra-high-voltage transmission systems, particularly given the increasing integration of renewable energy sources connected via electronic converters, thereby contributing to the reliability, operational security, and stability of the National Interconnected System.

KEYWORDS: *Synchronous condenser. Reactive power. Voltage control. Electric Power System. Brazilian Interconnected Power System.*

RESUMEN
Este trabajo presenta un análisis técnico de la aplicación de compensadores síncronos en Sistemas Eléctricos de Potencia, con énfasis en los aspectos constructivos, operativos y en los beneficios que aportan a la estabilidad y al control de tensión. El estudio aborda un compensador síncrono instalado en un sistema de transmisión de 525 kV, describiendo su principio de funcionamiento y los principales sistemas responsables de su operación, incluyendo la excitación, la regulación automática de tensión, la refrigeración, la distribución de gases, la lubricación, la inyección de aceite, el convertidor estático de frecuencia, la protección y la supervisión. La metodología se basa en una revisión bibliográfica, el análisis técnico del equipo y la evaluación de datos operativos relacionados con la corriente y la tensión de excitación en función de la potencia reactiva. Los resultados permitieron caracterizar la relación entre la potencia reactiva, la corriente de excitación y la tensión de excitación en régimen permanente. Los beneficios relacionados con el fortalecimiento de la red eléctrica, el soporte de tensión y la estabilidad de los sistemas de potencia se discuten con base en la literatura especializada. Se concluye que los compensadores síncronos constituyen una solución estratégica para los sistemas de transmisión de extra alta tensión, especialmente ante la creciente integración de fuentes renovables conectadas mediante convertidores electrónicos, contribuyendo a la confiabilidad, la seguridad operativa y la estabilidad del Sistema Interconectado Nacional.

PALABRAS-CLAVE: *Compensador síncrono. Potencia reactiva. Control de tensión. Sistema Eléctrico de Potencia. Sistema Interconectado Nacional.*

1. INTRODUÇÃO

O controle de tensão no Sistema Interligado Nacional (SIN), ou Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro, é realizado pelos operadores de tempo real com base em valores de tensão (kV) e potência reativa (MVAr), topologia do sistema e período de carga. As faixas de tensão são definidas pelos estudos de cargas, planejamento, pré-operação e variam conforme o período de carga (leve, média ou pesada) (ONS, 2018). Os níveis de tensão dependem diretamente do fluxo de potência reativa, de modo que a deficiência de MVAr causa queda de tensão e o excesso causa elevação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Os equipamentos de controle de tensão (ECT) atuam na geração, absorção e fluxo de reativos: capacitores, reatores, compensadores síncronos, unidades geradoras e tapes de transformadores são alguns dos equipamentos responsáveis pela compensação da energia reativa em um sistema de transmissão de energia elétrica, porém, este trabalho tem como foco os compensadores síncronos (máquinas síncronas operando em regime de motor sem carga mecânica), por serem especialmente eficientes para o “ajuste fino”, ou seja, para o controle preciso da tensão no sistema, uma vez que permitem variação contínua e rápida da potência reativa por meio da regulação da excitação do rotor.

No SIN, o principal suporte provém das usinas hidrelétricas (localizadas distantes dos centros de carga), porém, tornam-se necessários outros meios para realizar tal controle. Os compensadores síncronos instalados mais próximos aos centros de carga auxiliam no suporte de tensão evitando violações de tensão e melhorando a estabilidade de todo o sistema.

Este artigo técnico apresenta uma análise detalhada do compensador síncrono instalado em uma Subestação do sistema de transmissão de energia elétrica, abordando os aspectos construtivos, operacionais e de manutenção. O compensador síncrono é uma máquina síncrona utilizada para controle dinâmico de potência reativa e suporte de tensão em sistemas elétricos de potência. Diferentemente de bancos de capacitores e reatores convencionais, o compensador possui capacidade de resposta contínua, permitindo ajustes finos da potência reativa e contribuindo significativamente para a estabilidade do Sistema Interligado Nacional.

Os compensadores síncronos aumentam o nível de curto-circuito disponível na barra, melhoram a regulação de tensão e fornecem suporte dinâmico de reativos, especialmente em períodos de carga pesada ou em regiões com elevada participação de geração renovável, na maioria das vezes intermitente. Sua utilização é estratégica para manter as tensões dentro das faixas estabelecidas pelo ONS e evitar danos a equipamentos de consumidores e do próprio SEP (para-raios, transformadores, motores).

O objetivo deste estudo é analisar as características construtivas e os princípios de funcionamento de um compensador síncrono, com ênfase em sua atuação na compensação de potência reativa em Sistemas Elétricos de Potência. Busca-se descrever os principais sistemas auxiliares associados à operação da máquina e avaliar, a partir dos dados operacionais apresentados, a relação entre potência reativa, corrente de excitação e tensão de excitação.

Como contribuição do estudo, apresenta-se uma análise aplicada de um compensador síncrono instalado na malha de 525 kV, integrando a descrição de seus subsistemas à interpretação de dados de corrente e tensão de excitação em função da potência reativa. A pesquisa possui caráter descritivo, bibliográfico e documental, com abordagem técnica aplicada,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

baseada em literatura especializada, documentos técnicos e dados operacionais do equipamento analisado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Potência reativa e controle de tensão nos sistemas elétricos de potência

A operação segura de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) depende diretamente do equilíbrio entre geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica. Além da potência ativa, responsável pela realização de trabalho útil, a potência reativa exerce papel fundamental na manutenção dos campos eletromagnéticos necessários ao funcionamento de transformadores, motores e demais equipamentos elétricos.

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2018), o controle de tensão constitui uma das atividades mais importantes para a operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo realizado por meio do gerenciamento dos recursos de potência reativa disponíveis na rede. A inadequada compensação reativa pode provocar afundamentos ou elevações de tensão, reduzindo a qualidade da energia fornecida e aumentando o risco de desligamentos em cascata. De acordo com o ONS, a compensação de potência reativa permite otimizar o desempenho das redes elétricas, reduzindo perdas por efeito Joule, aumentando a capacidade de carregamento das linhas de transmissão e melhorando os níveis de tensão das barras das subestações. Dessa forma, os recursos de compensação reativa são considerados elementos essenciais para a estabilidade operativa dos sistemas modernos de transmissão de energia elétrica.

O crescimento da demanda energética e a expansão geográfica dos sistemas de transmissão tornaram ainda mais relevante o emprego de equipamentos especializados para suporte de potência reativa. Entre esses equipamentos destacam-se bancos de capacitores, bancos de reatores, Compensadores Estáticos de Reativos (*SVC*), *STATCOMs* e compensadores síncronos. Cada tecnologia apresenta vantagens específicas, sendo selecionada conforme as características operacionais da instalação.

2.2. Compensação reativa em sistemas de transmissão

Historicamente, o controle de potência reativa foi realizado principalmente por bancos de capacitores e reatores. Entretanto, a crescente complexidade das redes elétricas levou ao

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

desenvolvimento de tecnologias capazes de fornecer respostas mais rápidas e precisas às variações de carga e às contingências operacionais.

Segundo Muzitano (2007), a seleção da tecnologia de compensação deve considerar fatores como extensão das linhas de transmissão, níveis de carregamento, estabilidade operacional, investimento necessário e capacidade de resposta dinâmica. Em determinadas situações, dispositivos estáticos apresentam excelente desempenho econômico; em outras, torna-se necessária a utilização de equipamentos que forneçam compensação reativa contínua e dinâmica.

A utilização de dispositivos dinâmicos tornou-se ainda mais importante devido à crescente participação de fontes renováveis de energia, principalmente parques eólicos e usinas solares fotovoltaicas. Diferentemente dos geradores síncronos convencionais, essas tecnologias normalmente utilizam conversores eletrônicos de potência e contribuem de forma reduzida para a inércia do sistema e para os níveis de curto-circuito disponíveis na rede elétrica.

Nesse cenário, os compensadores síncronos passaram a desempenhar papel estratégico nos sistemas elétricos modernos, promovendo suporte dinâmico de potência reativa, aumento da potência de curto-circuito e melhoria das condições de estabilidade do sistema.

2.3. Compensadores síncronos

Os compensadores síncronos são máquinas síncronas operando sem carga mecânica significativa ligadas ao seu eixo, conectadas diretamente ao sistema elétrico com o objetivo de fornecer ou absorver potência reativa. Seu princípio de funcionamento é semelhante ao de um gerador síncrono convencional, sendo a corrente de excitação responsável pelo controle da potência reativa produzida ou absorvida pela máquina.

Quando operam em condição de sobreexcitação, os compensadores fornecem potência reativa ao sistema, contribuindo para elevação dos níveis de tensão das barras elétricas. Em condição de subexcitação, passam a absorver potência reativa, auxiliando na redução de sobretensões. Essa característica permite um controle contínuo e extremamente preciso da tensão do sistema.

Segundo Marken et al. (2011), os compensadores síncronos apresentam vantagens significativas em relação aos dispositivos estáticos. Além do fornecimento de potência reativa, contribuem para a estabilidade transitória da rede, aumentam a potência de curto-circuito disponível e fornecem suporte adicional durante contingências operacionais. Os autores destacam que esses equipamentos são especialmente importantes em sistemas elétricos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

sujeitos a rápidas variações de carga e em regiões com elevada participação de fontes renováveis.

Embora compensadores síncronos, SVCs e STATCOMs sejam empregados para compensação dinâmica de potência reativa, apresentam características distintas. Os compensadores síncronos fornecem inércia eletromecânica ao sistema e, segundo os autores consultados, contribuem significativamente para o nível de curto-circuito. Os *SVC*s apresentam elevada capacidade de controle de potência reativa por meio de dispositivos controlados por tiristores, enquanto os *STATCOMs* utilizam conversores fonte de tensão capazes de fornecer resposta ainda mais rápida em determinadas condições operacionais. Por outro lado, diferentemente dos dispositivos totalmente estáticos, os compensadores síncronos contribuem fisicamente para o aumento da inércia do sistema e para o fortalecimento elétrico das barras onde são instalados.

2.4. A importância dos compensadores síncronos em sistemas modernos

Bartz (2022) destaca que a instalação de compensadores síncronos em subestações de extra-alta tensão tem contribuído significativamente para o fortalecimento do Sistema Interligado Nacional. De acordo com o autor, esses equipamentos promovem melhoria dos níveis de tensão, aumento da confiabilidade operacional e maior flexibilidade para os operadores do sistema.

Além disso, os compensadores síncronos possuem elevada capacidade de suportar sobrecargas temporárias e contribuir para o fornecimento de corrente durante faltas elétricas. Essa característica aumenta a robustez da rede e melhora o desempenho dos sistemas de proteção e controle.

O documento *Technical Brochure 885* do CIGRÉ (2022) reforça que a crescente inserção de fontes renováveis tem provocado redução da inércia e dos níveis de curto-circuito dos sistemas elétricos em diversos países. Como consequência, observa-se uma retomada mundial da utilização de compensadores síncronos para fortalecimento da rede elétrica, principalmente em sistemas caracterizados por baixa inércia ou elevada participação de recursos conectados por eletrônica de potência.

2.5. Compensadores síncronos e a integração de fontes renováveis

A transição energética observada nas últimas décadas tem promovido a substituição gradual de usinas convencionais por fontes renováveis intermitentes. Essa transformação altera significativamente as características dinâmicas dos sistemas elétricos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Segundo Kenyon et al. (2020), a elevada participação de inversores eletrônicos reduz a contribuição de inércia natural ao sistema elétrico, tornando a rede mais suscetível a oscilações de frequência e problemas associados à estabilidade de tensão. Nesse contexto, os autores defendem a utilização de compensadores síncronos como elemento complementar às fontes renováveis, permitindo restaurar parte das características eletromecânicas anteriormente fornecidas pelos geradores convencionais.

Complementando essa visão, Sajadi, Mather e Hodge (2026) demonstram que os compensadores síncronos contribuem simultaneamente para a estabilidade de frequência, estabilidade angular e estabilidade de tensão. Os autores destacam ainda que a localização estratégica desses equipamentos pode maximizar seus benefícios operacionais e aumentar significativamente a segurança da rede elétrica.

2.6. Aspectos construtivos dos compensadores síncronos

Os aspectos construtivos dos compensadores síncronos influenciam diretamente seu desempenho operacional. Segundo Maier e Kadam (2024), o projeto dessas máquinas deve considerar parâmetros como potência reativa nominal, níveis de curto-circuito requeridos, capacidade térmica, sistema de resfriamento e requisitos de estabilidade dinâmica.

Os autores destacam que o emprego de hidrogênio como fluido refrigerante permite elevada eficiência térmica e redução das perdas mecânicas associadas à ventilação. Além disso, sistemas modernos de excitação estática controlada por tiristores garantem respostas rápidas e precisas às variações operacionais do sistema elétrico.

Frontin (2013) ressalta que os equipamentos de alta tensão estão em constante evolução tecnológica, impulsionados pelas necessidades de expansão da infraestrutura elétrica e pelo aumento dos requisitos de confiabilidade operacional. Nesse contexto, os compensadores síncronos modernos incorporam sistemas avançados de supervisão, proteção e automação que contribuem para o aumento da disponibilidade operacional e da segurança do equipamento.

2.7. Síntese da literatura

A revisão bibliográfica evidencia consenso entre autores, operadores do sistema elétrico e instituições técnicas quanto à relevância da compensação reativa para a operação segura dos Sistemas Elétricos de Potência. As publicações analisadas demonstram que os compensadores síncronos constituem uma das tecnologias mais completas para suporte dinâmico de tensão, controle de potência reativa e fortalecimento da rede elétrica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Os estudos do ONS (2018), Marken et al. (2011), Bartz (2022), CIGRÉ (2022), Kenyon et al. (2020), Maier e Kadam (2024) e Sajadi et al. (2026) convergem ao demonstrar que esses equipamentos oferecem benefícios relevantes para sistemas com alta participação de geração renovável, contribuindo para aumento da confiabilidade, estabilidade e segurança operativa do Sistema Interligado Nacional.

Essa revisão fornece a base teórica necessária para compreender os aspectos construtivos e operacionais do compensador síncrono analisado neste trabalho, bem como sua importância estratégica para o controle de tensão e compensação de potência reativa em sistemas de transmissão de energia elétrica.

3. METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa caracteriza-se como descritiva, bibliográfica e documental, tendo como objeto de estudo um compensador síncrono conectado a uma malha de transmissão de 525 kV. O procedimento metodológico compreendeu a revisão da literatura especializada, a análise documental de informações técnicas do equipamento e a avaliação de dados operacionais, buscando relacionar o comportamento das grandezas de excitação com os níveis de potência reativa fornecidos ou absorvidos pela máquina.

Os dados operacionais utilizados neste estudo foram obtidos por meio de registros históricos do sistema de supervisão da instalação analisada. Os valores apresentados nos Gráficos 1 e 2 correspondem a pontos operacionais em regime permanente, selecionados de forma a representar diferentes condições de fornecimento e absorção de potência reativa observadas durante a operação do compensador síncrono. Por questões de confidencialidade industrial, informações específicas da instalação e parâmetros proprietários do equipamento não são divulgadas, sendo apresentados apenas os dados necessários para a análise técnica proposta.

A análise concentrou-se na relação entre a potência reativa e as variáveis do sistema de excitação, especificamente a corrente de campo e a tensão de excitação. Os resultados permitiram caracterizar o comportamento dessas grandezas em diferentes condições operativas do compensador síncrono, representadas por pontos de operação em regime permanente. Dessa forma, as conclusões apresentadas restringem-se às relações observadas entre potência reativa e excitação, não sendo possível, a partir dos dados analisados, quantificar parâmetros relacionados à estabilidade transitória, resposta dinâmica ou contribuição ao nível de curto-circuito do sistema elétrico, aspectos abordados apenas com base na literatura especializada.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.1. Fundamentação técnica

O compensador síncrono é uma máquina síncrona conectada ao sistema elétrico sem carga mecânica significativa no eixo, operando com a finalidade de fornecer ou absorver potência reativa conforme as necessidades operativas da rede. Seu princípio de funcionamento baseia-se no controle da corrente de excitação do rotor, permitindo a regulação contínua da potência reativa trocada com o sistema elétrico. Em condição de sobreexcitação, o equipamento fornece potência reativa à rede, contribuindo para a elevação dos níveis de tensão. Por outro lado, em condição de subexcitação, absorve potência reativa, auxiliando no controle de sobretensões e na manutenção dos níveis adequados de tensão.

O equipamento analisado neste estudo está conectado a uma malha de transmissão em extra-alta tensão de 525 kV por meio de um transformador de conexão de 525/13,8 kV. O compensador síncrono possui faixa nominal de compensação reativa de -180 a 300 MVAr, operando com tensão nominal de 13,8 kV e frequência de 60 Hz. Sua aplicação é destinada ao fornecimento e à absorção de potência reativa, contribuindo para o suporte de tensão e para a operação adequada do sistema de transmissão.

Os compensadores síncronos apresentam capacidade de resposta dinâmica compatível com aplicações de controle de tensão em sistemas de potência. Embora dispositivos estáticos como *SVC*s e *STATCOMs* possam apresentar tempos de resposta mais rápidos devido à ausência de componentes rotativos, os compensadores síncronos oferecem benefícios adicionais associados à inércia eletromecânica e ao aumento do nível de curto-circuito, permitindo ajustes contínuos da potência reativa em função das condições operacionais do sistema. Sua contribuição tornou-se ainda mais relevante com a crescente inserção de fontes renováveis de energia conectadas por meio de conversores eletrônicos, que normalmente apresentam menor contribuição de inércia e corrente de curto-circuito quando comparadas às usinas convencionais. O compensador síncrono pode ser observado na Figura 1.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Vista geral do compensador síncrono



Fonte: próprio autor

3.2. Constituição do compensador síncrono

O compensador síncrono é composto por vários conjuntos de peças e sistemas. A Figura 2 apresenta uma vista explodida dos principais componentes mecânicos, elétricos e sistemas auxiliares que compõem um compensador síncrono moderno. A identificação individual dos componentes permite compreender a integração entre os sistemas responsáveis pelo controle da potência reativa, bem como pelos processos de partida, parada, refrigeração, lubrificação, proteção e monitoramento da máquina. Essa integração é fundamental para garantir a confiabilidade operacional e a disponibilidade do equipamento.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Componentes do compensador síncrono



Fonte: imagem elaborada com auxílio do Microsoft Copilot (IA generativa), sob revisão e responsabilidade do autor (2026).

1. Tampa Dianteira

A tampa dianteira constitui a estrutura de fechamento frontal da máquina, protegendo os componentes internos contra agentes externos, poeira, umidade e contaminações.

2. Mancal Dianteiro

O mancal dianteiro é responsável por sustentar o eixo principal e absorver esforços mecânicos durante a operação. Sua função é garantir o alinhamento do rotor e minimizar atritos e vibrações.

3. Estator (Carcaça)

O estator corresponde à parte fixa da máquina. Sua carcaça abriga o núcleo magnético e os enrolamentos do estator, fornecendo sustentação estrutural ao conjunto e contribuindo para a dissipação térmica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4. Enrolamento do Estator

É formado por bobinas trifásicas distribuídas ao longo do núcleo do estator. Esses enrolamentos são responsáveis pela interação eletromagnética com o campo magnético produzido pelo rotor e pela troca de potência reativa com o sistema elétrico.

5. Rotor

O rotor é a parte girante do compensador síncrono. Seu principal papel é produzir o campo magnético rotativo necessário para o funcionamento da máquina, girando em velocidade síncrona com a frequência do sistema elétrico.

6. Enrolamento de Campo

Instalado no rotor, o enrolamento de campo recebe corrente contínua proveniente do sistema de excitação. A intensidade dessa corrente determina o fluxo magnético produzido pelo rotor e, consequentemente, a quantidade de potência reativa fornecida ou absorvida pela máquina.

7. Anéis Coletores

Os anéis coletores são dispositivos metálicos montados no eixo do rotor que permitem a transferência de corrente contínua do sistema de excitação para o enrolamento de campo.

8. Escovas

As escovas mantêm contato elétrico com os anéis coletores, conduzindo a corrente de excitação para o rotor mesmo durante sua rotação contínua.

9. Mancal Traseiro

Assim como o mancal dianteiro, o mancal traseiro tem a função de suportar o eixo principal, garantindo estabilidade mecânica, alinhamento e operação suave da máquina.

10. Tampa Traseira

A tampa traseira protege os componentes localizados na extremidade posterior da máquina e serve como estrutura de suporte para o sistema de ventilação.

11. Ventilador

Responsável por auxiliar a refrigeração interna da máquina, promovendo a remoção do calor gerado nos componentes ativos e contribuindo para sua operação segura.

Sistemas Auxiliares

12. Sistema de Refrigeração

O sistema de refrigeração é responsável pela remoção do calor produzido durante a operação do compensador síncrono. Normalmente utiliza trocadores de calor associados à circulação de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

hidrogênio, ar ou água, mantendo as temperaturas de operação dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante.

13. Sistema de Lubrificação (*LOS – Lubrication Oil System*)

O sistema *LOS* fornece óleo lubrificante aos mancais da máquina, reduzindo atrito, desgaste mecânico e temperatura dos componentes rotativos. Sua operação contínua é fundamental para a confiabilidade do equipamento.

14. Sistema de Injeção de Óleo (*IOS – Injection Oil System*)

O *IOS* injeta óleo sob alta pressão nos mancais durante os processos de partida e parada. Essa pressão cria uma película hidrostática que reduz o atrito entre o eixo e os mancais antes da formação completa do filme de óleo do sistema principal de lubrificação.

15. Sistema de Excitação

O sistema de excitação fornece e controla a corrente contínua aplicada ao enrolamento de campo do rotor. É composto pelo Regulador Automático de Tensão (*AVR - Automatic Voltage Regulator*), transformador de excitação e pontes retificadoras tiristorizadas. Sua função é controlar a potência reativa e a tensão do sistema elétrico.

16. Conversor de Frequência Estático - *Static Frequency Converter* (*SFC)*

O Conversor Estático de Frequência é utilizado para a partida da máquina. Por meio da variação controlada da frequência fornecida ao compensador, o *SFC* acelera gradualmente o rotor até próximo da velocidade síncrona, permitindo posteriormente sua sincronização com a rede elétrica.

17. Caixa de Ligação

A caixa de ligação abriga os terminais de conexão dos circuitos elétricos da máquina, incluindo alimentação, aterramento, instrumentação, proteção e controle.

18. Base e Estrutura

A base estrutural suporta mecanicamente todos os componentes do compensador síncrono. Sua função é absorver os esforços dinâmicos, vibrações e cargas mecânicas geradas durante a operação, mantendo a integridade e o alinhamento do equipamento.

3.3 Sistema de distribuição de gases

O sistema de distribuição de gases possui papel fundamental na operação segura do equipamento. São utilizados hidrogênio (H_2), dióxido de carbono (CO_2) e ar comprimido. O hidrogênio é empregado como meio refrigerante devido à sua elevada capacidade de transferência térmica e baixa densidade. O dióxido de carbono é utilizado durante procedimentos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de purga para evitar misturas explosivas entre hidrogênio e ar. O ar comprimido é empregado em processos auxiliares e acionamentos pneumáticos de válvulas. O sistema realiza monitoramento contínuo das pressões, pureza e condições operacionais dos gases, garantindo segurança e confiabilidade operacional.

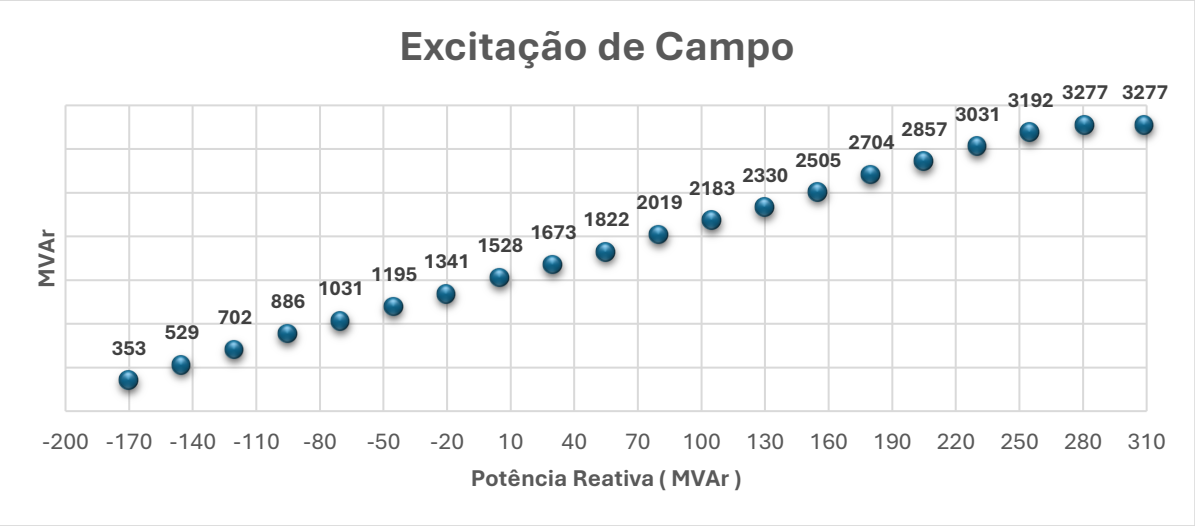
3.4. Sistema de excitação

O sistema de excitação instalado utiliza tecnologia baseada em pontes retificadoras tiristorizadas. O conjunto é composto por transformador de excitação, regulador de tensão, módulos eletrônicos de controle, pontes retificadoras e circuito de campo. A tensão alternada proveniente do transformador de excitação é retificada por pontes tiristorizadas, produzindo tensão contínua aplicada ao circuito de campo e possibilitando o controle da corrente de excitação. Essa corrente é aplicada ao rotor através dos anéis coletores e escovas.

O regulador de tensão monitora continuamente as grandezas elétricas e ajusta automaticamente a corrente de campo, garantindo o controle da tensão terminal e da potência reativa. É possível verificar o comportamento da corrente elétrica conforme a variação da potência reativa. A análise quantitativa mostra que, no intervalo observado de potência reativa, de -170 MVAr a 310 MVAr, a corrente de excitação aumenta de 353 A para aproximadamente 3.277 A. Na região próxima de potência reativa nula, a corrente situa-se em torno de 1.500 A, enquanto valores positivos crescentes de potência reativa exigem maior corrente de campo. Entre -170 MVAr e 280 MVAr, a tendência é predominantemente crescente; no trecho final, entre 280 MVAr e 310 MVAr, a corrente permanece praticamente constante, em aproximadamente 3.277 A. Esse comportamento indica aproximação de uma região de limitação da excitação nos dados analisados. Entretanto, os dados disponíveis não permitem afirmar que esse patamar corresponda ao limite nominal do fabricante, devendo ser interpretado somente como limite observado na série operacional referente à excitação de campo apresentada.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Gráfico 1. Excitação de campo x potência reativa



Fonte: próprio autor.

3.5. Regulador de tensão

Sua função é manter a tensão do sistema da máquina dentro dos limites estabelecidos pelos procedimentos operativos. Além do controle de tensão, o regulador também atua na proteção da máquina por meio de limitadores operacionais, evitando condições que possam comprometer a integridade dos enrolamentos, núcleo magnético ou sistema de excitação. Outro ponto importante é o controle da tensão referente à excitação do campo magnético da máquina, como se observa no Gráfico 2.

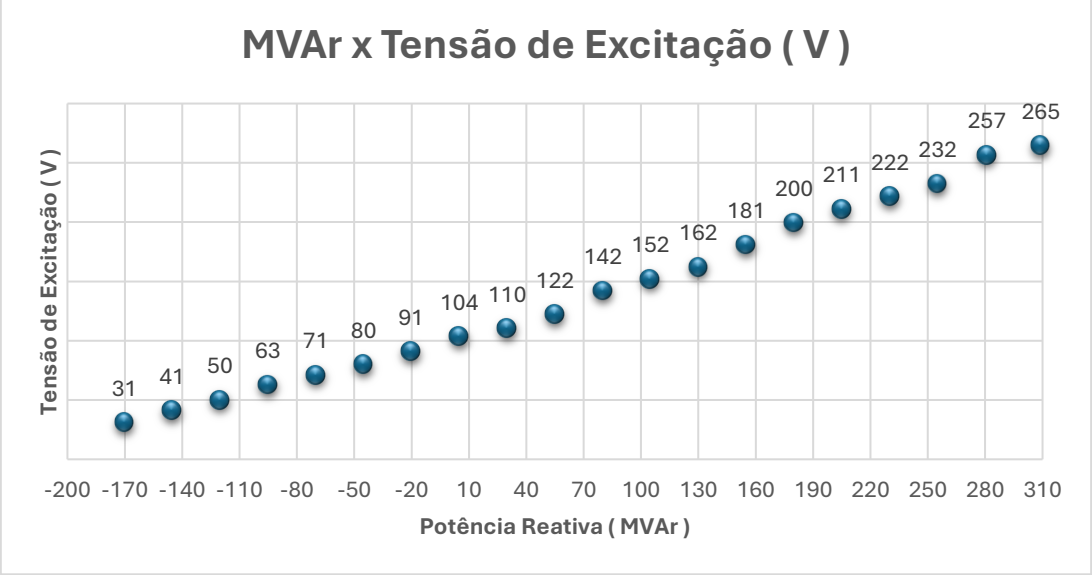
O *AVR* realiza medições contínuas das grandezas elétricas da máquina e do sistema, processando informações como tensão terminal, corrente de estator, corrente de campo, potência reativa e fator de potência. A partir desses parâmetros, o controlador executa ajustes automáticos na corrente de excitação do rotor, permitindo respostas rápidas às variações de carga e às oscilações de tensão da rede elétrica.

Em situações de contingência do sistema elétrico, como perdas de linhas de transmissão, rejeição de carga ou oscilações de tensão, o regulador atua de forma praticamente instantânea, aumentando ou reduzindo a excitação para restabelecer as condições operacionais desejadas. No Gráfico 2, a tensão de excitação apresenta comportamento também crescente com a potência reativa, variando de 31 V em -170 MVAr para 265 V em 310 MVAr. Próximo à região de potência reativa nula, observa-se tensão de excitação de 104 V para 5 MVAr. Para 180

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

MVAr, o valor alcança 200 V e, em 280 MVAr, 257 V. Considerando os extremos da série, a tensão de excitação cresce aproximadamente 753%, enquanto a corrente de campo cresce aproximadamente 828%. Os dois conjuntos de dados confirmam a associação direta entre aumento da excitação e fornecimento crescente de potência reativa no intervalo analisado. Essa interpretação é coerente com o princípio de operação do compensador síncrono: o ajuste da excitação modifica a troca de potência reativa e, consequentemente, sua contribuição ao controle de tensão. Os gráficos representam pontos operacionais em regime permanente; portanto, não permitem quantificar tempo de resposta dinâmica, estabilidade transitória ou limites térmicos sem dados adicionais do fabricante e registros temporais.

Gráfico 2. Tensão de excitação x potência reativa



Fonte: próprio autor.

Os valores utilizados na elaboração dos Gráficos 1 e 2 são apresentados na Tabela 1. Os dados correspondem a pontos operacionais em regime permanente obtidos a partir de registros históricos do sistema de supervisão da instalação analisada, sendo utilizados para avaliar a relação entre potência reativa, corrente de excitação e tensão de excitação do compensador síncrono.

Tabela 1. Dados operacionais utilizados na análise

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Potência Reativa (MVAr)	*Corrente de Excitação (A)*	*Tensão de Excitação (V)*
-170,02	*353*	*31,0*
-145,15	*529*	*41,0*
-120,12	*702*	*50,0*
-95,09	*886*	*63,0*
-70,06	*1031*	*71,0*
-45,02	*1195*	*80,0*
-20,16	*1341*	*91,0*
5,04	*1528*	*103,7*
30,07	*1673*	*110,4*
55,10	*1822*	*122,3*
80,14	*2019*	*142,0*
105,00	*2183*	*152,2*
130,03	*2330*	*162,1*
155,06	*2505*	*181,0*
180,10	*2704*	*199,5*
205,13	*2856,7*	*210,9*
230,33	*3031,0*	*221,8*
255,19	*3191,8*	*232,2*
280,90	*3277,0*	*256,5*
309,12	*3276,7*	*264,5*

Fonte: Dados operacionais da instalação analisada, elaborados pelo autor.

Observa-se uma relação diretamente proporcional entre a potência reativa fornecida pelo compensador síncrono e as grandezas associadas ao sistema de excitação. À medida que a potência reativa aumenta, verifica-se elevação progressiva tanto da corrente quanto da tensão de excitação, comportamento compatível com os princípios de operação da máquina síncrona.

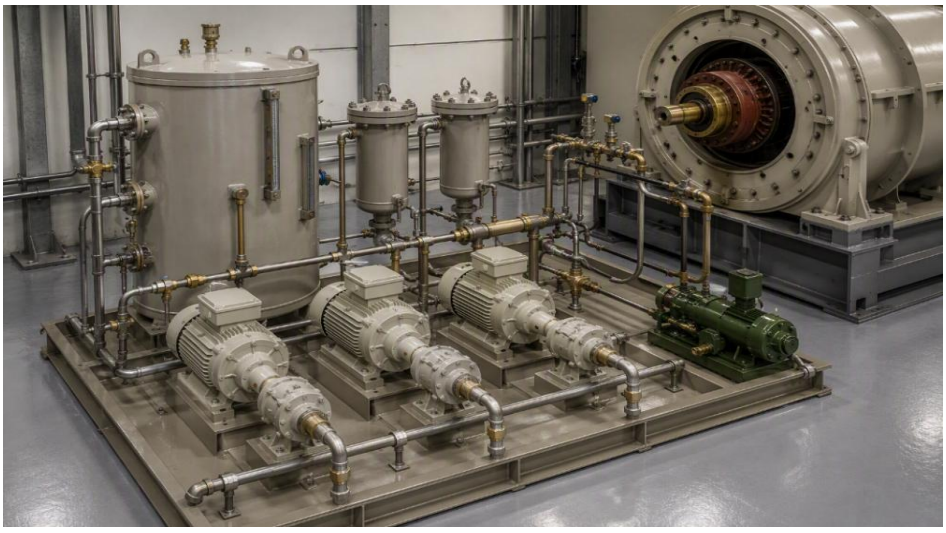
3.6. Sistema de lubrificação (*LOS*)

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O Sistema de Óleo de Lubrificação (*LOS - Lubrication Oil System*) desempenha um papel essencial para a integridade mecânica do compensador síncrono, sendo responsável pela formação contínua de uma película lubrificante entre o eixo e as superfícies dos mancais. Essa película impede o contato metálico direto entre os componentes, reduzindo significativamente o desgaste e as perdas mecânicas decorrentes do atrito, como também tem o objetivo de dissipar calor e aumentar a vida útil dos componentes. A perda de lubrificação pode causar danos severos ao equipamento, razão pela qual existem diversas lógicas de proteção associadas a esse sistema.

O sistema é composto por reservatório, bombas elétricas principais e auxiliares, filtros de partículas, válvulas de controle, instrumentos de monitoramento e trocadores de calor. Os filtros têm papel fundamental na retenção de impurezas que poderiam comprometer a superfície dos mancais ou reduzir a eficiência do sistema. Em condições normais de operação, a pressão e a temperatura do óleo permanecem dentro de limites estabelecidos pelo fabricante. Qualquer desvio nesses parâmetros pode indicar obstruções, falhas de bombas, contaminação do óleo ou problemas nos sistemas de resfriamento. Por essa razão, alarmes e intertravamentos são configurados para alertar e, quando necessário, promover o desligamento seguro da máquina.

Figura 3. Sistema de Lubrificação



Fonte: imagem elaborada com auxílio de Microsoft Copilot (IA generativa), sob revisão e responsabilidade do autor (2026).

3.7. Sistema de Injeção de Óleo (*IOS*)

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Durante a partida e parada da máquina ocorre a necessidade de formação de um filme de óleo pressurizado sob os mancais. Esse processo reduz o atrito entre eixo e mancal. O sistema *IOS* utiliza bombas de alta pressão capazes de elevar significativamente a pressão do óleo, permitindo a formação da película hidrostática necessária para operação segura.

Durante a partida o sistema permanece ativo até que a velocidade operacional seja atingida. Durante a parada permanece em funcionamento até a completa imobilização do rotor.

3.8. Sistema *SFC* – Static Frequency Converter

O *SFC* é responsável pela aceleração inicial do compensador síncrono. Por meio de eletrônica de potência, fornece frequência variável para permitir o aumento gradual da velocidade do rotor. Após atingir velocidade próxima da síncrona, ocorre a sincronização com o sistema elétrico. Durante a parada, o *SFC* também pode atuar como sistema de frenagem elétrica controlada. A utilização do *SFC* elimina a necessidade de motores auxiliares de partida e aumenta a eficiência operacional do conjunto.

3.9. Processo de partida

O processo de partida de compensadores síncronos desse porte envolve uma sequência coordenada de verificações e acionamentos desde o início até a sincronização com o SEP. Inicialmente são verificadas as pré-condições operacionais dos sistemas auxiliares, ou seja, é realizada uma sequência de verificação dos sistemas auxiliares a fim de identificar condições que possam comprometer a segurança da partida. Em seguida são acionados os sistemas de óleo, refrigeração, gases e excitação. O *SFC* acelera o rotor progressivamente até superar a velocidade síncrona. Essa velocidade superior é necessária porque, no momento em que a frequência da máquina é confrontada com a frequência do sistema elétrico, a frequência da máquina deve estar acima da do SEP; assim, à medida que a frequência da máquina se iguala à do sistema (60 Hz), ocorre a sincronização, ou seja, a máquina passa a operar com a mesma frequência do SEP. Após a sincronização automática, o compensador passa a operar conectado ao sistema elétrico, fornecendo ou absorvendo potência reativa conforme requerido.

3.10. Processo de parada

Durante a parada, o compensador síncrono é desacelerado de forma controlada conforme a lógica operacional do sistema. O *SFC* atua no auxílio à desaceleração da máquina, enquanto os sistemas de controle promovem a redução gradual da excitação. Após a parada

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

completa do rotor, os sistemas auxiliares são desligados de acordo com a sequência operacional estabelecida para o equipamento.

3.11. Sistema de proteção

O compensador síncrono possui um conjunto abrangente de proteções elétricas e mecânicas. São necessárias, no mínimo, as seguintes proteções para monitorar a máquina:

Temperatura dos mancais; Temperatura dos enrolamentos; Vibração; Sobrevelocidade; Pressão dos gases; Pressão e vazão de óleo; Falhas do sistema de excitação; Falhas do *SFC*.

As lógicas de bloqueio mecânico (86M) e elétrico (86E) garantem atuação rápida em condições críticas, protegendo tanto a máquina quanto os equipamentos associados.

3.12. Sistema de supervisão SAGE

A supervisão operacional é realizada pelo Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia (SAGE). O operador possui acesso às telas de medição, alarmes, estados operacionais e comandos.

O sistema permite acompanhamento em tempo real das grandezas elétricas, mecânicas e térmicas, facilitando a tomada de decisões operacionais.

3.13. Importância para o sistema elétrico

De acordo com a literatura especializada, compensadores síncronos apresentam elevada relevância para sistemas modernos de transmissão. Além do suporte de potência reativa, podem contribuir para aumento da potência de curto-circuito, melhoria da estabilidade angular e suporte dinâmico de tensão. Em sistemas de extra-alta tensão, sua utilização reduz riscos operacionais e melhora os índices de confiabilidade de toda a malha elétrica.

4. CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise técnica demonstra que o compensador síncrono constitui um equipamento complexo, formado por diversos subsistemas integrados. A confiabilidade operacional depende diretamente da adequada interação entre sistema de gases, excitação, lubrificação, injeção de óleo, *SFC*, proteções e supervisão. Sua aplicação em instalações de 525 kV representa uma solução eficiente para controle de tensão, reativos e estabilidade do sistema elétrico brasileiro.

Ao longo deste trabalho foi possível compreender que o compensador síncrono possui características operacionais que o diferenciam dos dispositivos estáticos de compensação

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

reativa, como, por exemplo, reatores, capacitores ou até mesmo compensadores estáticos, principalmente pela sua capacidade de fornecer ou absorver potência reativa de forma contínua, dinâmica e com elevada precisão. De acordo com a literatura, essa característica permite respostas rápidas frente às variações de carga e às contingências do sistema elétrico, contribuindo significativamente para a manutenção dos níveis adequados de tensão.

A análise dos sistemas auxiliares demonstrou que o desempenho geral da máquina não depende apenas de sua capacidade eletromagnética, mas também da confiabilidade dos subsistemas responsáveis por refrigeração, lubrificação, controle, proteção e supervisão. A atuação coordenada desses sistemas contribui para condições seguras de operação e para a confiabilidade operacional esperada do equipamento.

Outro aspecto relevante identificado é a importância do sistema de excitação e do regulador automático de tensão, que exercem papel fundamental no controle da potência reativa e na estabilidade da rede elétrica. A rapidez de resposta desses sistemas, segundo os autores consultados, permite que o compensador atue de maneira eficaz em situações críticas, colaborando para a recuperação de tensões e para a estabilidade transitória do SEP.

De acordo com a literatura, os compensadores síncronos podem contribuir para o aumento do nível de curto-circuito das barras onde estão conectados, fortalecendo eletricamente a rede e melhorando o desempenho dos esquemas de proteção. Essa característica torna-se cada vez mais importante diante da crescente inserção de fontes renováveis de geração que utilizam conversores eletrônicos e apresentam menor contribuição para a inércia e robustez do sistema.

Dessa forma, conclui-se que os compensadores síncronos representam uma solução estratégica para os sistemas modernos de transmissão de energia elétrica, especialmente em redes de extra-alta tensão. Além de promoverem o controle eficiente da potência reativa e da tensão, contribuem para a confiabilidade, segurança operativa e estabilidade do Sistema Interligado Nacional, consolidando-se como equipamentos fundamentais para os desafios atuais e futuros do setor elétrico brasileiro.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se ampliar a análise com séries históricas de operação, comparar o desempenho do compensador síncrono com tecnologias estáticas de compensação e avaliar indicadores quantitativos de resposta dinâmica, estabilidade de tensão e contribuição ao nível de curto-circuito da rede.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REFERÊNCIAS

BARTZ, Augusto Tiziano Holz. Avaliação do comportamento de compensadores síncronos instalados em subestações elétricas de extra-alta tensão. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

CIGRÉ. *Guide on the assessment, specification and design of synchronous condenser for power system with predominance of low or zero inertia generators. Technical Brochure 885.* Paris: CIGRÉ, 2022. Disponível em: *https://www.e-cigre.org/publications/detail/885-guide-on-the-assessment-specification-and-design-of-synchronous-condenser-for-power-system-with-predominance-of-low-or-zero-inertia-generators*.html. Acesso em: 3 ago. 2026.

FRONTIN, Sérgio O. Equipamentos de Alta Tensão: prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília: CIGRÉ-Brasil, 2013.

KENYON, Rick Wallace; HOKE, Anderson; TAN, Jin; KROPOSKI, Benjamin; HODGE, Bri-Mathias. *Grid-Following Inverters and Synchronous Condensers: A Grid-Forming Pair? In: 2020 Clemson University Power Systems Conference (PSC). Clemson, SC, USA: IEEE, 2020. DOI: 10.1109/PSC50246.2020.9131310.*

MAIER, G.; KADAM, S. *Design aspects of synchronous condensers. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, v. 141, p. 647-657, 2024. DOI: 10.1007/s00502-024-01279-w.*

MARKEN, P. E.; DEPOIAN, A. C.; SKLIUTAS, J.; VERRIER, M. *Modern synchronous condenser performance considerations. In: IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI: IEEE, 2011. p. 1-5. DOI: 10.1109/PES.2011.6039011.*

MUZITANO, G. F. Comparação da compensação de reativo entre linhas convencionais e não convencionais. 2007. Projeto de Graduação (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Procedimentos de Rede: Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos. Rio de Janeiro: ONS, Revisão 2018.08, 2018.

Disponível em: https://www.ons.org.br. Acesso em: 9 set. 2026.

SAJADI, A.; MATHER, B.; HODGE, B. M. *Synchronous Condensers: Enhancing Stability in Power Systems with Grid-Following Inverters. arXiv preprint arXiv:2604.02622, 2026. DOI: 10.48550/arXiv.2604.02622.* Disponível em: https://arxiv.org/abs/2604.02622. Acesso em: 3 ago. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.