

MOTOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES OPERANDO COMO COMPENSADOR SÍNCRONO NA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM REDES ELÉTRICAS

Vinícius de Almeida Alvarenga¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil
(vinicius.w4@gmail.com)

Resumo: A potência reativa, quando presente em excesso nos sistemas elétricos, pode ocasionar perdas elétricas, quedas de tensão, sobrecarga de condutores e redução da eficiência energética. Embora seja essencial para o funcionamento de diversos equipamentos, essa parcela de potência não realiza trabalho útil, permanecendo em circulação na rede elétrica. Com o objetivo de minimizar esses impactos, este trabalho apresenta uma solução para a compensação de potência reativa por meio da utilização de um motor síncrono de polos salientes operando como compensador síncrono. Os resultados obtidos demonstram a capacidade do sistema em fornecer ou absorver potência reativa, contribuindo para a manutenção do fator de potência em valores próximos da unidade.

Palavras-chave: Motor síncrono; Fator de potência; Potência reativa; Cargas Capacitivas; Cargas indutivas.

INTRODUÇÃO

A potência reativa não realiza trabalho útil, porém é indispensável para a criação e a manutenção dos campos eletromagnéticos em equipamentos como motores, transformadores e reatores. Essa potência circula continuamente entre a fonte e as cargas, sendo caracterizada pela defasagem entre a tensão e a corrente elétrica, a qual depende da natureza da carga, podendo ser indutiva ou capacitiva.

Embora necessária para o funcionamento de diversos equipamentos, o excesso de potência reativa na rede elétrica pode ocasionar aumento das perdas elétricas, quedas de tensão, sobrecarga de condutores e transformadores, redução da capacidade de transmissão e diminuição da eficiência energética do sistema. Dessa forma, torna-se fundamental a adoção de técnicas para sua compensação, visando à melhoria da qualidade da energia elétrica e à manutenção de elevados valores de fator de potência.

Entre as soluções tradicionalmente empregadas para a compensação de potência reativa destacam-se os bancos de capacitores e de reatores, amplamente utilizados em sistemas de distribuição e industriais. Outra alternativa consiste na utilização de compensadores estáticos de potência reativa, baseados em conversores eletrônicos, capazes de fornecer ou absorver potência reativa de forma dinâmica por meio do controle de dispositivos semicondutores.

Além dessas tecnologias, as máquinas síncronas também podem ser empregadas para essa finalidade. Quando operadas sem carga mecânica e com a corrente de excitação adequadamente controlada, essas máquinas passam a atuar como compensadores síncronos, fornecendo ou absorvendo potência reativa conforme a necessidade da rede elétrica. Essa característica permite controlar o fator de potência, reduzir as perdas elétricas e contribuir para a estabilidade da tensão na rede elétrica.

Nesse contexto, este trabalho apresenta a modelagem e a simulação de um motor síncrono de polos salientes operando como compensador síncrono para a compensação de potências reativas indutiva e capacitiva em redes elétricas. O modelo foi desenvolvido no ambiente PLECS e avaliado por meio de simulações que demonstram a capacidade da máquina em fornecer e absorver potência reativa, contribuindo para a correção do fator de potência.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Inicialmente, são apresentados os conceitos teóricos que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho, com ênfase na potência reativa, no fator de potência e no compensador síncrono. Em seguida, são descritos os materiais e os métodos utilizados na modelagem e na implementação da simulação. Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, são apresentadas as conclusões do trabalho.

CONCEITOS PRELIMINARES

Os sistemas elétricos de potência têm operado cada vez mais próximos de seus limites de capacidade, enquanto as redes de transmissão e distribuição estão mais suscetíveis às interferências ambientais, falhas operacionais, distorções harmônicas e baixos fatores de potência. Nesse cenário, torna-se crescente a necessidade de empregar técnicas que garantam maior qualidade da energia elétrica, eficiência operacional e confiabilidade do sistema.

O fator de potência (FP) é um dos principais indicadores da eficiência com que a energia elétrica é utilizada em um sistema. Em condições senoidais, ele é definido pelo cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente, conforme apresentado na Equação 1.

$$FP = \cos(\varphi) \quad (1)$$

Um fator de potência próximo da unidade indica que a maior parte da potência fornecida é convertida em potência ativa, responsável pela realização de trabalho útil. Por outro lado, valores reduzidos de fator de potência evidenciam uma maior participação da potência reativa, resultando em aumento das correntes circulantes, maiores perdas elétricas, quedas de tensão e redução da capacidade de transmissão do sistema.

A relação de fase entre a corrente e a tensão também permite identificar a natureza predominante da carga. Quando a corrente está adiantada em relação à tensão, a carga apresenta comportamento predominantemente capacitivo. Em contrapartida, quando a corrente está atrasada em relação à tensão, a carga é predominantemente indutiva. Para cargas puramente resistivas, tensão e corrente permanecem em fase. A Figura 1 ilustra as formas de onda correspondentes às cargas resistiva, indutiva e capacitiva.

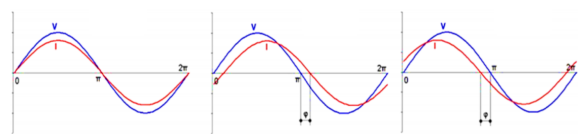


Figura 1. Defasagem da onda de corrente em relação a tensão.

Os setores comercial, industrial e residencial utilizam equipamentos cada vez mais sensíveis às perturbações no fornecimento de energia elétrica. Dessa forma, a adoção de soluções para problemas relacionados à estabilidade de tensão e ao baixo fator de potência torna-se essencial para assegurar o fornecimento contínuo de energia dentro dos parâmetros nominais de operação, garantindo o funcionamento adequado das cargas (Barbosa, 2013).

Atualmente, existem diversas técnicas para a correção do fator de potência, baseadas no fornecimento ou na absorção de potência reativa. A escolha da técnica depende das características da

instalação, do tipo de carga e dos requisitos de desempenho do sistema elétrico.

Além da seleção da tecnologia de compensação, a definição do ponto de instalação também influencia diretamente sua eficiência. Os equipamentos de compensação podem ser instalados individualmente junto às cargas, em grupos de cargas ou no ponto de alimentação principal da instalação elétrica. A Figura 2 ilustra as principais configurações de instalação desses dispositivos.

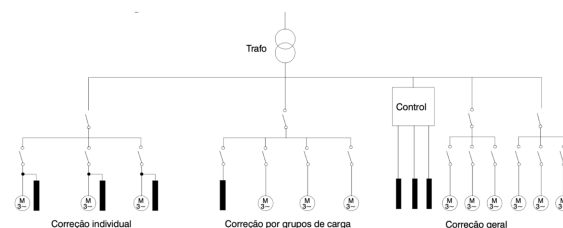


Figura 2. Locais de instalação dos compensadores.

Como alternativa para a correção do fator de potência, foi escolhida a máquina síncrona de polos salientes operando como compensador síncrono, devido à sua capacidade de fornecer ou absorver potência reativa de forma controlada. Nessa condição de operação, a máquina funciona sem carga mecânica acoplada ao eixo, permitindo compensar a potência reativa demandada pelo sistema, tanto de natureza indutiva quanto capacitiva. Além da correção do fator de potência, os compensadores síncronos também são empregados no controle da tensão em sistemas de transmissão, na melhoria da estabilidade do sistema elétrico, no aumento da capacidade de curto-circuito e na redução das perdas elétricas (Fitzgerald, et al., 2013).

A máquina síncrona é um conversor eletromecânico de energia em corrente alternada cuja velocidade de operação em regime permanente n_s , permanece constante e é diretamente proporcional à frequência f da rede elétrica e inversamente proporcional ao número de polos p conforme Equação 2.

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2)$$

O estator é constituído por enrolamentos de armadura distribuídos simetricamente ao longo do núcleo ferromagnético, enquanto o rotor contém o enrolamento de campo, responsável pela geração do fluxo magnético necessário ao funcionamento da máquina (Chapman, 2013).

Quando utilizada como compensador síncrono, a máquina opera conectada à rede elétrica e sem carga mecânica no eixo, girando livremente à velocidade síncrona. Nessa configuração, sua principal função é regular o fluxo de potência reativa do sistema elétrico, podendo operar de forma semelhante a um reator, ao absorver potência reativa, ou a um capacitor, ao fornecer potência reativa (Ragnevr, 2005).

O controle da potência reativa é realizado por meio da variação da corrente de excitação do rotor, que modifica o fluxo magnético e, conseqüentemente, a tensão interna induzida da máquina. A dinâmica do circuito de campo pode ser representada por

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (3)$$

enquanto a tensão interna induzida é dada por

$$E_a = w_e L_{md} i_f \quad (4)$$

em que V_f é a tensão aplicada ao enrolamento de campo, R_f e L_f são a resistência e a indutância do circuito de campo, respectivamente, i_f é a corrente de excitação, w_e é a velocidade angular elétrica e L_{md} é a indutância de magnetização no eixo direto.

Quando a corrente de excitação é aumentada, a tensão interna induzida E_a torna-se superior à tensão terminal V_t , ou seja

$$E_a > V_t \quad (5)$$

fazendo com que a máquina opere em condição de sobre-excitação. Nessa condição, o compensador síncrono fornece potência reativa ao sistema elétrico, apresentando comportamento equivalente ao de uma fonte capacitiva.

Por outro lado, quando a corrente de excitação é reduzida, a tensão interna induzida E_a torna-se inferior à tensão terminal V_t

$$E_a < V_t \quad (6)$$

caracterizando a operação em condição de subexcitação. Nesse caso, a máquina absorve potência reativa da rede elétrica, comportando-se de maneira semelhante a uma carga indutiva.

Dessa forma, o ajuste da corrente de excitação permite controlar continuamente o fluxo de potência reativa entre a máquina e a rede elétrica, possibilitando a correção do fator de potência, a redução das perdas elétricas e a manutenção dos níveis de tensão dentro dos limites de operação do sistema.

Já quando a tensão interna induzida E_a é aproximadamente igual à tensão terminal V_t da máquina, isto é

$$E_a \approx V_t \quad (7)$$

o compensador síncrono opera em condição de excitação normal. Nessa situação, a máquina praticamente não fornece nem absorve potência reativa da rede elétrica, mantendo o fator de potência próximo da unidade. A corrente do estator assume seu valor mínimo, sendo utilizada principalmente para suprir as perdas elétricas, magnéticas e mecânicas da máquina, caracterizando uma condição de equilíbrio entre a potência reativa gerada e a consumida.

MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho, foi realizado o estudo de um sistema composto por cargas resistivas, indutivas e capacitivas, com um motor síncrono conectado à rede elétrica, visando analisar o comportamento das correntes e das potências sob diferentes condições de operação. Para isso, foi utilizado o ambiente de simulação PLECS, no qual foi desenvolvido um modelo contendo uma rede trifásica de 460 V, um motor síncrono de polos salientes de 100 KVA e diferentes configurações de carga. A configuração com carga indutiva é apresentada na Figura 3, enquanto a configuração com carga capacitiva é apresentada na Figura 4.

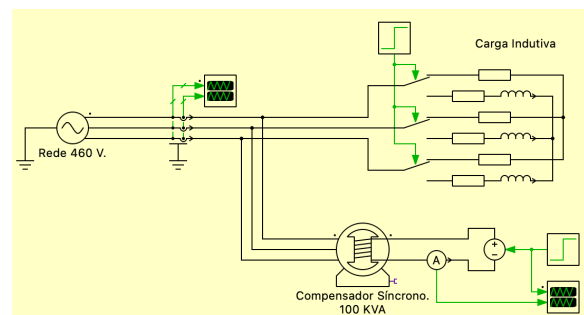


Figura 3. Circuito rede, motor e carga indutiva.

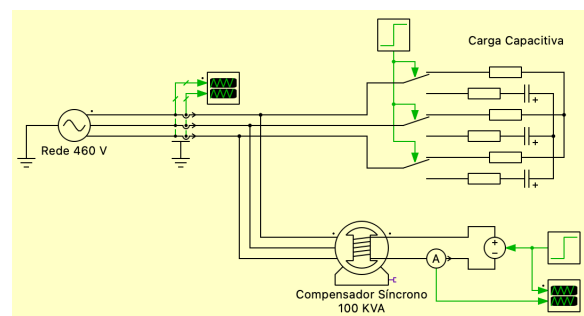


Figura 4. Circuito rede, motor e carga capacitiva.

A carga capacitiva conectada à rede é composta por três capacitores de 1,55 mF, cada um associado em série a um resistor de 1,4 Ω . De forma análoga, a carga indutiva é constituída por três indutores de 2 mH, cada um conectado em série a um resistor de 800 m Ω . Para representar a condição de fator de potência unitário, foi utilizada uma carga puramente resistiva, composta por três resistores de 5 Ω , um em cada fase da rede.

O motor síncrono utilizado possui como principal característica construtiva um rotor de polos salientes, cujo enrolamento de campo é alimentado por corrente contínua, possibilitando a geração do fluxo magnético necessário para manter o sincronismo entre o campo magnético do rotor e o campo girante produzido pelo estator. Para representar o comportamento eletromecânico da máquina nas simulações, foram adotados os parâmetros elétricos e mecânicos apresentados na Tabela I.

Tabela 1. Dados da máquina síncrona.

$P_{nom} = 100 \text{ hp}$	$V = 460 \text{ V}$
$R'_{kq} = 0,2269 \Omega$	$L'_{lf} = 1,505 \text{ mH}$
$f = 60 \text{ Hz}$	$L_{mq} = 2,257 \text{ mH}$
$R'_f = 28,4 \text{ m}\Omega$	$J_m = 0,75 \text{ kg m}$
$L_{mdsat} = L_{md}$	$L'_{lkq} = 1,129 \text{ mH}$
$p = 2$	$L_{ls} = 752,3 \text{ uH}$
$R'_{kd} = 113,5 \text{ m}\Omega$	$L_{md} = 8,276 \text{ mH}$
$n_{nom} = 1800 \text{ rpm}$	$L'_{lkd} = 752,3 \text{ uH}$
$R_s = 113,6 \Omega$	$N_s/N_f = 1/47$

Em seguida, foram realizadas duas simulações: a primeira com uma carga capacitiva, na qual o motor síncrono operou de forma subexcitada para absorver potência reativa, apresentando comportamento indutivo; e a segunda com uma carga indutiva, na qual o motor operou de forma sobreexcitada para fornecer potência reativa, apresentando comportamento capacitivo.

Cada simulação foi dividida em três estágios. No primeiro estágio, o sistema opera apenas com uma carga puramente resistiva e o motor síncrono com excitação nominal, resultando em fator de potência unitário.

No segundo estágio, aos 4 s, é conectada uma carga indutiva ou capacitiva, mantendo-se inalterada a corrente de excitação do motor. Nessa condição, observa-se a redução do fator de potência da rede devido ao aumento da demanda ou do fornecimento de potência reativa pela carga.

No terceiro estágio, aos 7 s, a corrente de excitação do motor é ajustada, tornando-o subexcitado ou sobreexcitado, conforme o tipo de carga conectada, de modo que a potência reativa fornecida ou absorvida pelo motor compense a potência reativa da carga. Como resultado, a potência reativa demandada da rede é praticamente anulada, restabelecendo o fator de potência para um valor próximo da unidade.

Ao final das simulações, será possível observar a eficácia do compensador síncrono na correção do fator de potência da rede. Na primeira simulação, após a conexão da carga indutiva, o motor síncrono operando em condição de sobre-excitação fornece a potência reativa necessária para compensar a carga, restabelecendo o fator de potência para um valor próximo da unidade. Na segunda simulação, após a conexão da carga capacitiva, o motor síncrono operando em condição de subexcitação absorve a potência reativa excedente da rede, também restabelecendo o fator de potência para um valor próximo da unidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulação 1 - Carga indutiva

Após a simulação do circuito 1, foram obtidas as formas de onda de tensão e corrente da rede trifásica, permitindo analisar o comportamento do sistema. A Figura 5 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente na rede. No intervalo antes de 4 s, o sistema opera apenas com uma carga puramente resistiva, verificando-se que a corrente permanece em fase com a tensão, caracterizando um fator de potência próximo da unidade. A partir de 4 s, uma carga indutiva é conectada à rede, provocando uma defasagem adiantada da corrente em relação a tensão. Esse comportamento evidencia o fornecimento de potência reativa pela carga indutiva e a consequente redução do fator de potência da rede.

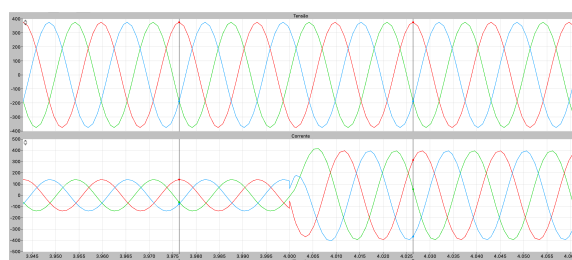


Figura 5. Defasagem da tensão x corrente indutiva.

A Figura 6 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente da rede após a atuação do compensador síncrono. No intervalo anterior a 7 s, observa-se uma defasagem entre a tensão e a corrente provocada pela carga indutiva como mostrado na figura anterior, caracterizada pelo atraso da corrente em relação à tensão. A partir de 7 s, a corrente de excitação do motor síncrono é ajustada para que a máquina forneça a potência reativa necessária à compensação da carga. Como resultado, verifica-se que a tensão e a corrente passam a permanecer praticamente em fase, evidenciando a correção do fator de potência e a eficácia do compensador síncrono na compensação da potência reativa.

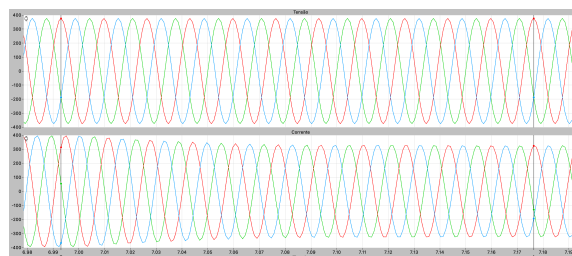


Figura 6. Defasagem da tensão x corrente indutiva.

Na Figura 7 é apresentado a evolução da potência reativa e do fator de potência da rede ao longo dos três estágios da simulação. No primeiro estágio, em que o sistema alimenta apenas uma carga puramente resistiva, a potência reativa permanece próxima de

zero, resultando em um fator de potência próximo da unidade.

No segundo estágio, após a conexão da carga indutiva, observa-se um aumento da potência reativa absorvida pela carga, fazendo com que seu valor se torne positivo e reduzindo o fator de potência para aproximadamente 0,79.

No terceiro estágio, com o ajuste da corrente de excitação do motor síncrono, o compensador passa a fornecer a potência reativa necessária para compensar a carga indutiva. Como consequência, a potência reativa fornecida pela rede retorna a valores próximos de zero e o fator de potência é restabelecido para um valor próximo da unidade, comprovando a eficiência da compensação realizada pelo motor síncrono.

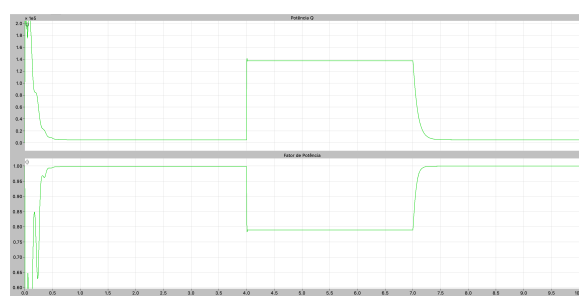


Figura 7. Potência reativa e Fator de Potência.

Já a Figura 8 apresenta a tensão contínua aplicada à excitatriz e a corrente de excitação no enrolamento de campo do motor síncrono.

No primeiro e no segundo estágios da simulação, a máquina opera com excitação nominal, sendo aplicada uma tensão contínua de 160 V ao circuito de campo.

No terceiro estágio, para que o motor opere em condição de sobre-excitação e forneça a potência reativa necessária à compensação da carga indutiva, a tensão de excitação é elevada para 500 V. Como consequência, observa-se o aumento da corrente de campo, permitindo que o motor síncrono restabeleça o fator de potência da rede para um valor próximo da unidade.

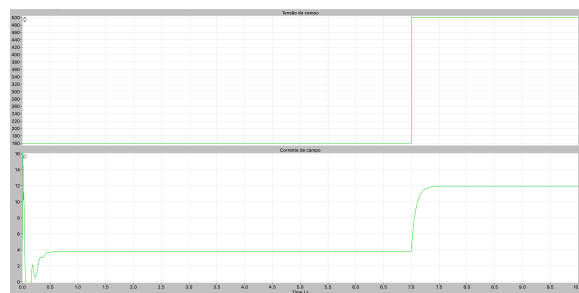


Figura 8. Tensão e corrente de campo.

Simulação 2 - Carga capacitiva

Após a simulação do circuito 2, foram obtidas as formas de onda de tensão e corrente da rede trifásica, permitindo analisar o comportamento do sistema. A Figura 9 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente na rede. No intervalo antes de 4 s, o sistema opera apenas com uma carga puramente resistiva, verificando-se que a corrente permanece em fase com a tensão, caracterizando um fator de potência próximo da unidade. A partir de 4 s, uma carga capacitiva é conectada à rede, provocando uma defasagem atrasada da corrente em relação a tensão. Esse comportamento evidencia o fornecimento de potência reativa pela carga capacitiva e a consequente redução do fator de potência da rede.

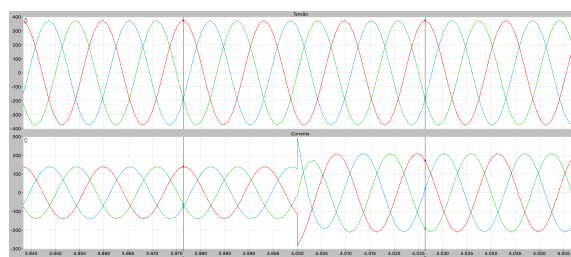


Figura 9. Defasagem da tensão x corrente capacitiva.

A Figura 10 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente da rede após a atuação do compensador síncrono. No intervalo anterior a 7 s, observa-se uma defasagem entre a tensão e a corrente provocada pela carga capacitiva como mostrado na figura anterior, caracterizada pelo adiantamento da corrente em relação à tensão. A partir de 7 s, a corrente de excitação do motor síncrono é ajustada para que a máquina forneça a potência reativa necessária à compensação da carga. Como resultado, verifica-se que a tensão e a corrente passam a permanecer praticamente em fase, evidenciando a correção do fator de potência e a eficácia do compensador síncrono na compensação da potência reativa.

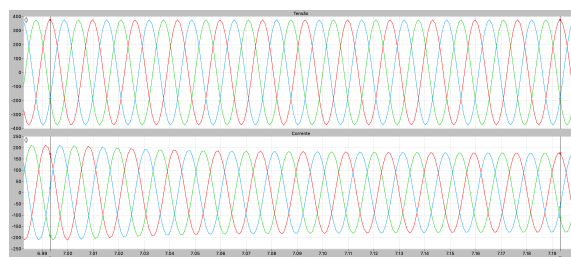


Figura 10. Defasagem da tensão x corrente indutiva.

Na Figura 11 é apresentada a evolução da potência reativa e do fator de potência da rede ao longo dos três estágios da simulação. No primeiro estágio, em que o sistema alimenta apenas uma carga puramente resistiva, a potência reativa permanece próxima de zero, resultando em um fator de potência próximo da unidade.

No segundo estágio, após a conexão da carga capacitiva, observa-se um aumento da potência reativa fornecida pela carga, fazendo com que seu valor se torne positivo e reduzindo o fator de potência para aproximadamente 0,81.

No terceiro estágio, com o ajuste da corrente de excitação do motor síncrono, o compensador passa a fornecer a potência reativa necessária para compensar a carga capacitiva. Como consequência, a potência reativa fornecida pela rede retorna a valores próximos de zero e o fator de potência é restabelecido para um valor próximo da unidade, comprovando a eficiência da compensação realizada pelo motor síncrono.

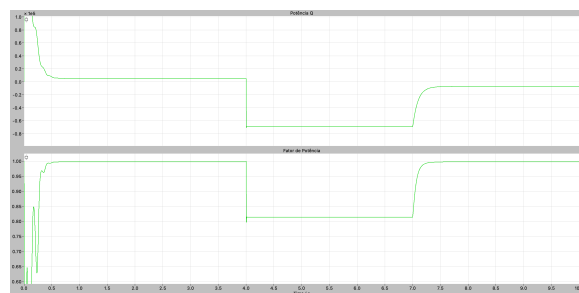


Figura 11. Potência reativa e Fator de Potência.

Já a Figura 12 apresenta a tensão contínua aplicada à excitatriz e a corrente de excitação no enrolamento de campo do motor síncrono.

No primeiro e no segundo estágios da simulação, a máquina opera com excitação nominal, sendo aplicada uma tensão contínua de 160 V ao circuito de campo.

No terceiro estágio, para que o motor opere em condição de subexcitação e absorva a potência reativa necessária à compensação da carga capacitiva, a tensão de excitação é ajustada para 10 V. Como consequência, observa-se a diminuição da corrente de campo, permitindo que o motor síncrono restabeleça o fator de potência da rede para um valor próximo da unidade.

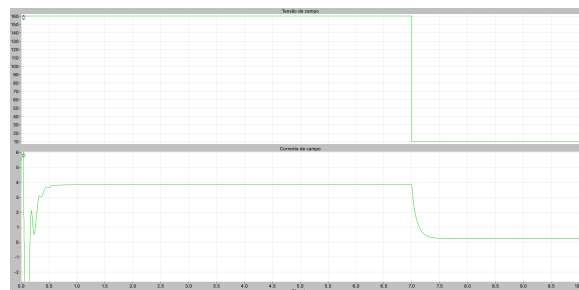


Figura 12. Tensão e corrente de campo.

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a compensação de potência reativa e seus efeitos sobre o desempenho de um sistema elétrico. Para isso, foi investigada a aplicação de uma máquina síncrona operando como motor a vazio e conectada à rede elétrica, atuando como compensador síncrono. Essa configuração constitui uma alternativa eficiente para o fornecimento ou absorção de potência reativa, contribuindo para a correção do fator de potência e para a melhoria das condições de operação da rede.

Com o objetivo de validar os fundamentos teóricos apresentados, foram realizadas simulações no software PLECS. Os resultados demonstraram que, por meio do ajuste da corrente de excitação do rotor, o motor síncrono pode operar em condição de sobreexcitação ou subexcitação, comportando-se, respectivamente, como uma fonte capacitiva ou indutiva de potência reativa. Dessa forma, a máquina é capaz de fornecer ou absorver potência reativa conforme a necessidade do sistema elétrico.

Os resultados obtidos evidenciam que, após a atuação do compensador síncrono, houve uma redução significativa da potência reativa fornecida pela rede, conforme ilustrado nas Figuras 7 e 11. Além disso, os valores do fator de potência apresentados nas mesmas figuras, aproximaram-se da unidade após a compensação. Esses resultados confirmam a eficácia do motor síncrono como compensador de potência reativa, demonstrando sua capacidade de corrigir o fator de potência e contribuir para a melhoria da qualidade da energia elétrica.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) pelos conhecimentos compartilhados sobre máquinas síncronas, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, F. M. Estabilidade de Sistemas Elétricos de Energia 2013. Tese - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.
- CHAPMAN, Stephen. Motores de Indução: Fundamentos de Máquinas Elétricas. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY C. , UMANS, S. D. (2003) Electric Machinery, 6th edition. McGraw-Hill, 2003.
- RAGNEV, W. Estudo de potência reativa, tensão, contingência e perdas em empresas de energia elétrica localizadas na grande São Paulo. 2005. Dissertação-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.