

COMPENSAÇÃO ESTÁTICA DE REATIVOS
Uma Solução para Problemas de Operação de Sistemas Elétricos

Sigmar Maurer Deckmann

UNICAMP - FEE - DSCE
Caixa Postal, 6101 - Campinas, S.P

Resumo

O artigo focaliza alguns problemas de operação de sistemas de energia elétrica, ligados à operação de cargas especiais, responsáveis pela geração de harmônicos, flutuações de tensão, desequilíbrio de fases e baixo fator de potência. O objetivo é mostrar a crescente importância que a compensação reativa está assumindo na solução desses problemas, em função da possibilidade do controle preciso e rápido da potência reativa em larga escala, utilizando dispositivos controláveis de eletrônica de potência e tecnologias de processamento e controle digitais. Através de um exemplo de aplicação mostra-se a atuação de um compensador estático tipo Reator Controlado por Tiristores na redução de flutuações rápidas de tensão.

REACTIVE STATIC COMPENSATION
A Solution for Power Systems Operation Problems

Abstract

The article focuses some operational problems of electric energy systems, related with the operation of abnormal loads, which are responsible for harmonics generation, voltage fluctuations, phase disbalancing, and low power factors. The objective is to emphasize the increasing importance of the reactive compensation in the solution of these problems. This is due to the ability of precise and fast control of large scale reactive power through the controlable power electronic devices and the technology of digital processing and control. An example of application illustrates the performance of a static compensator of the Thyristor Controlled Reactor Type in reducing the fast voltage fluctuations.

1. INTRODUÇÃO

Compensação reativa está se constituindo cada vez mais em um recurso indispensável para garantir a necessária qualidade de serviço para a operação de sistema de energia elétrica (SEE). A qualidade de serviço pode ser traduzida basicamente pela continuidade de suprimento, pureza da forma de onda e firmeza da tensão e da frequência do sistema CA.

O papel cada vez mais importante que a compensação reativa está assumindo é consequência de dois fatores preponderantes:

- i - do conhecimento e reconhecimento das potenciais melhorias que o controle da injeção e do fluxo de potência reativa podem introduzir na operação do sistema elétrico, aumentando seu desempenho estático e dinâmico;

- ii - dos avanços tecnológicos alcançados, principalmente nas áreas de eletrônica de potência e controle de processos, que resultaram em soluções técnicas para viabilizar o controle efetivo da potência reativa em níveis de MVAR.

Será mostrado neste trabalho que grande parte dos problemas enfrentados pelas empresas do setor elétrico e que são causados pela operação das chamadas cargas especiais podem ser resolvidos através da compensação reativa, utilizando os recursos hoje disponíveis da eletrônica de potência e do processamento e controle digitais.

2. CARGAS ESPECIAIS - FONTES DE PROBLEMAS PARA A OPERAÇÃO DE SEE

O consumidor convencional de energia elé

trica recebe sua conta de energia computada em função do consumo médio de potência ativa durante o mês. É pressuposto que o comportamento instantâneo da carga não se afasta muito dessa média e que tais variações não causam perturbações aos demais consumidores. O consumo de potência reativa só é taxado quando ocorrer a violação do limite de fator de potência (FP) médio mínimo de 0.85, sofrendo a conta um acréscimo a título de multa por baixo fator de potência. Esse problema é enfrentado particularmente pelas indústrias cuja carga, composta por motores de indução não compensados, pode gerar baixos fatores de potência durante a operação.

Através do registro de cargas em setores industriais típicos constatou-se que é praxe nas indústrias atender às exigências legais mínimas, ou seja, operar a carga de forma que o FP médio diário alcance 0.85. A figura 1 mostra alguns desses registros obtidos de Andrade (1987).

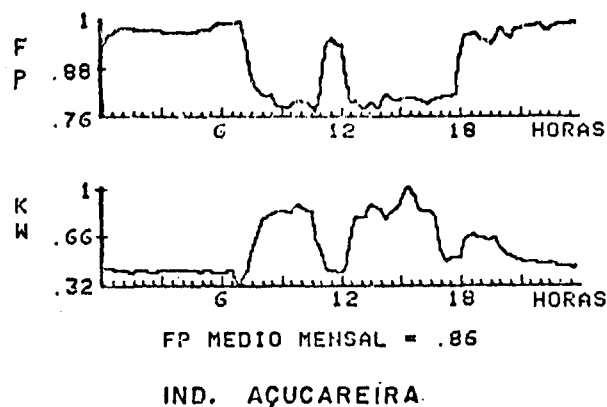
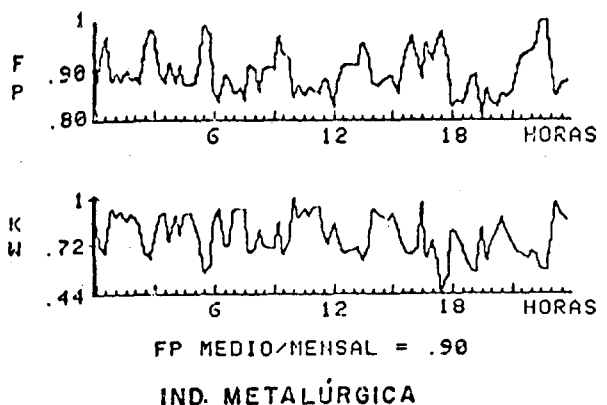


Fig. 1 - Curvas típicas de consumo.

Essas curvas mostram que não se pode ignorar o comportamento dinâmico das cargas, mesmo quando os valores médios previstos estão satisfeitos. Mesmo desprezando as variações em torno dos valores médios observados, a praxe acima mencionada conduz a pelo menos duas constatações que afetam significativamente a operação do sistema :

- i - A manutenção, pelo consumidor, de um FP médio em 0.85 implica em um suprimento, pela concessionária, de potência reativa média de 62% da potência ativa consumida;
- ii - A transferência de potência reativa através do sistema de suprimento causa queda de tensão, prejudicando o próprio consumidor e eventualmente outros, ligados no mesmo alimentador.

Esses problemas têm sido encarados, até recentemente, do ponto de vista estático, sendo recomendado o uso de compensação reativa tanto para as cargas e para o sistema de transmissão, através da instalação de bancos de capacitores, reatores, compensadores síncronos e transformadores com derivações.

Mais recentemente, com o uso intensivo de energia elétrica em processos industriais, estimulado pelas crises de combustíveis fósseis e pelas melhorias alcançadas com a automação industrial, têm surgido problemas decorrentes da operação das cargas de grande porte, não-lineares, variáveis e desequilibradas. Em tais cargas especiais, constituídas por fornos a arco, pontes retificadoras, conversores estáticos, sistemas de acionamento por chaveamento, etc., as características dinâmicas passaram a se tornar predominantes, exigindo compensadores reativos cada vez mais rápidos e eficazes para garantir a qualidade de serviço das concessionárias.

Os principais problemas enfrentados pela operação do sistema elétrico e que podem ser relacionados com a operação dessas cargas especiais são :

- a) Aumento do nível de distorção da onda de tensão na rede, conseqüente do nível de harmônicos gerados pelas correntes dessas cargas não-lineares;
- b) Aumento do nível de desequilíbrio de fases, devido, p.ex., à operação independente das fases em fornos a arco e sistemas de tração monofásica;
- c) Flutuação da tensão devido à variação irregular da corrente da carga, podendo provocar efeito de cintilação luminosa ("lamp flicker") em toda região vizinha;
- d) Sobretensões e sobrecorrentes em pontos susceptíveis a ressonâncias série e paralela para as correntes harmônicas;
- e) Atuação errônea do sistema de proteção em conseqüência da distorção harmônica e flutuações de tensão e corrente;
- f) Aumento de perdas nos sistemas de transmissão, transformadores e rede de distribuição, tanto pela presença de correntes harmônicas como pelo aumento de fluxo de reativos para a carga;

g) Redução da margem de estabilidade do sistema de geração e transmissão, possibilitando o aparecimento de oscilações que podem levar ao colapso do sistema interligado.

Todos esses problemas já estão sendo enfrentados em maior ou menor escala pelas diversas empresas do setor elétrico brasileiro nos últimos 10 anos. Em cada um desses casos verifica-se que o controle reativo pode auxiliar na solução dos problemas exigindo, porém, o domínio tecnológico, em diferentes áreas como :

- construção de reatores de alta capacidade e baixas perdas;
- construção de capacitores compactos e baixas perdas;
- construção de válvulas de semicondutores controláveis;
- desenvolvimento de controladores rápidos analógicos e digitais;
- desenvolvimento de sensores, transdutores e filtros de sinais analógicos e digitais;
- desenvolvimento de esquemas de controle e algoritmos computacionais adequados para cada aplicação.

Já se dispõe hoje no Brasil de um nível suficiente de experiência nessas áreas isoladamente, permitindo que se promova a incorporação dessas experiências na solução dos problemas relacionados com a compensação estática de reativos em sistemas de energia elétrica.

3. O COMPENSADOR REATIVO IDEAL

Steinmetz (1917), um dos precursores da atual conceituação e formulação usada para modelagem e análise de sistemas de correntes elétricas senoidais, responsável pela introdução da análise fasorial e da representação de grandezas elétricas por variáveis complexas, foi quem estabeleceu pela primeira vez, no começo deste século, as condições de compensação reativa ideal, necessárias para equilibrar uma dada carga trifásica.

Essas condições, representadas pela equação 1, referem-se à situação mostrada na figura 2.

$$\begin{aligned} B_{ab}^c &= -B_{ab} + (G_{ca} - G_{bc}) / \sqrt{3} \\ B_{bc}^c &= -B_{bc} + (G_{ab} - G_{ca}) / \sqrt{3} \\ B_{ca}^c &= -B_{ca} + (G_{bc} - G_{ab}) / \sqrt{3} \end{aligned} \quad (1)$$

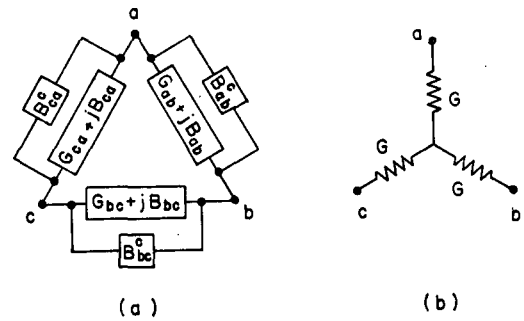


Fig. 2 - a) Circuito trifásico desequilibrado com compensador reativo; b) Circuito equivalente resultante.

Miller (1984) resume essa compensação através do seguinte princípio :

- a - Qualquer carga trifásica desbalanceada, linear e não aterrada, pode ser transformada em uma carga trifásica real balanceada, sem alterar a transferência de potência ativa entre a fonte e a carga, através da conexão de uma rede de compensação ideal em paralelo.
- b - A rede de compensação ideal pode ser puramente reativa.

Essa importante característica do compensador reativo ideal, no entanto, permanece até hoje quase inexplorada, senão desconhecida. A razão para isso é simples: a falta, até pouco tempo, de solução tecnológica para viabilizar um compensador ajustável para as condições variáveis das cargas.

Para se poder aplicar o princípio do compensador ideal a uma carga variável e desequilibrada, é necessário que a rede de compensação admita parâmetros reativos variáveis com controle independente por fase. As três fontes clássicas de reativos são os bancos de capacitores, os reatores e as máquinas síncronas. Todos apresentam dificuldades com relação à controlabilidade da potência reativa fornecida ou consumida.

No caso dos bancos capacitivos as principais dificuldades com respeito ao controle são devidas a :

- i - variação descontínua em face do chaveamento de unidades discretas na associação série-paralela dos capacitores;
- ii - transitórios de tensão e corrente durante o chaveamento dos capacitores;
- iii - possibilidade de excitação de correntes harmônicas devido a não-linearidades magnéticas (ferro-ressonância) ou da carga (fornos a arco, pontes chaveadas, etc.).

Os reatores, por sua vez, são equipamentos de construção similar a dos transformadores de potência, apresentando os problemas de não-linearidade e perdas típicas desses equipamentos. Sofrem também da restrição do controle descontínuo através da mudança discreta de derivações.

As máquinas síncronas, ao contrário, permitem o controle contínuo de reativos abrangendo dois quadrantes: para cargas indutivas e capacitivas. Mesmo assim, essa fonte de reativos não é adequada para operar como compensador reativo ideal pelas seguintes limitações:

- i - a resposta à ação de controle é lenta, da ordem de centenas de milissegundos, devido às constantes de tempo do sistema de excitação;
- ii - a máquina síncrona não permite o controle independente por fase.

Com o desenvolvimento de dispositivos semicondutores controláveis para altas potências, mais especificamente as válvulas de tiristores, tornou-se possível obter virtualmente o controle contínuo e independente da susceptância em cada fase do compensador. Em função dessa tecnologia resultaram, entre outros, os Reatores Controlados por Tiristores (RCT) e os Capacitores Chaveados por Tiristores (CCT). Nos dois casos a inserção dos elementos reativos só ocorre quando os tiristores são disparados pelo sinal de controle. Existem diferenças fundamentais entre o RCT e o CCT. No RCT o controle do disparo pode variar continuamente na faixa de condução do par tiristor-reator, i.e., para ângulos entre 90° e 180° , relativos à onda de tensão. Durante o bloqueio do tiristor a corrente é nula resultando uma corrente descontínua no RCT, o que introduz um significativo conteúdo harmônico, que necessita ser filtrado.

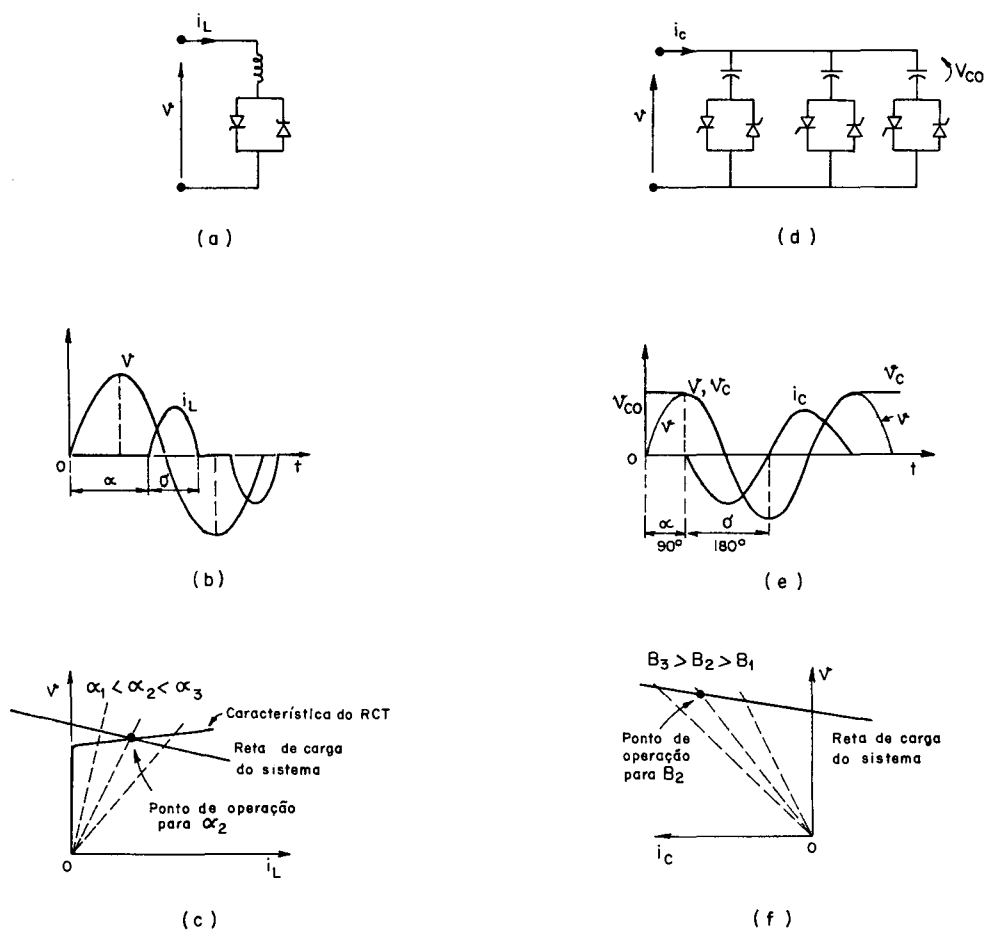


Fig. 3 - a) Circuito por fase do RCT sem perdas;
 b) Tensão e corrente no RCT para $90^\circ < \alpha < 180^\circ$;
 c) Característica estática de operação do RCT;
 d) Circuito por fase do CCT de 3 estágios;
 e) Tensão e corrente no CCT para disparo em $v = v_{CO}$;
 f) Característica estática do CCT.

No CCT, para minimizar as sobrecorrentes e sobretensões de chaveamento dos capacitores, o disparo dos tiristores só pode ser feito quando o nível de tensão no tiristor estiver próximo da tensão remanescente da carga prévia do capacitor. Essa restrição evita o surgimento de distorção harmônica no CCT, porém torna o controle demasiado lento para algumas aplicações como na redução das flutuações de tensão, responsáveis pela cintilação luminosa ("lamp flicker").

4. UMA APLICAÇÃO - O RCT PARA REDUÇÃO DE CINTILAÇÃO

A fim de ilustrar o potencial uso da compensação estática de reativos, será mostrada a aplicação de um reator controlado por tiristores (RCT) no controle de flutuações de tensão capazes de gerar cintilação luminosa. Essa experiência descreve os resultados de uma pesquisa sobre compensação estática (Deckmann, 1986) e na qual foram desenvolvidos os protótipos de um medidor de cintilação e duas versões de compensador RCT: um com controles analógicos (Benavides, 1986) e outro com controles digitais por microcomputador (Borjas, 1987).

Inicialmente é caracterizado o fenômeno da cintilação e depois são apresentados alguns resultados alcançados usando o RCT implementado. Maiores detalhes sobre os sistemas implementados podem ser encontrados nas referências mencionadas.

5. O EFEITO DA CINTILAÇÃO LUMINOSA

Um dos distúrbios causados pela operação de cargas variáveis é o surgimento de variações perceptíveis da intensidade luminosa, associadas às flutuações da tensão de suprimento. Esse efeito de cintilação é particularmente intenso na fase inicial de fusão nos fornos elétricos a arco e pode criar incômodo visual para os consumidores em toda a região suprida pela mesma rede de transmissão.

O nível dessas flutuações depende da rigidez elétrica do sistema de suprimento em relação às fontes de tensão. Uma forma simplificada para se tratar esse problema consiste em analisar o equivalente de Thévenin

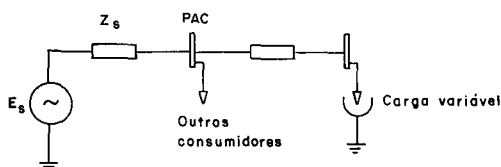


Fig. 4 - Circuito simplificado para análise das flutuações de tensão no PAC.

do sistema de suprimento no chamado Ponto de Acoplamento Comum (PAC), que corresponde ao ponto de interligação da carga perturbadora com os demais consumidores, conforme mostrado na figura 4.

Considerando as perdas desprezíveis no sistema de transmissão, pode-se relacionar as variações de tensão em um ponto k qualquer da rede com as variações de potência reativa nesse ponto, através da equação 2:

$$\Delta V_k \cong \frac{\Delta Q_k}{S_{cck}} \cdot 100\% \quad (2)$$

onde

- ΔV_k = variação percentual da tensão;
- ΔQ_k = variação da potência reativa;
- S_{cck} = potência de curto-circuito local.

Essa equação mostra a possibilidade de se regular a tensão através do controle da injeção de potência reativa local. Esse é o princípio básico da compensação reativa.

A percepção do efeito de cintilação depende da frequência das flutuações da tensão. A figura 5 mostra a curva de sensibilidade normalizada, obtida através de testes de percepção, realizadas com observadores submetidos ao efeito dessas flutuações. Apresenta também as curvas do limiar de percepção para flutuações senoidais e de onda quadrada (UIE, 1982).

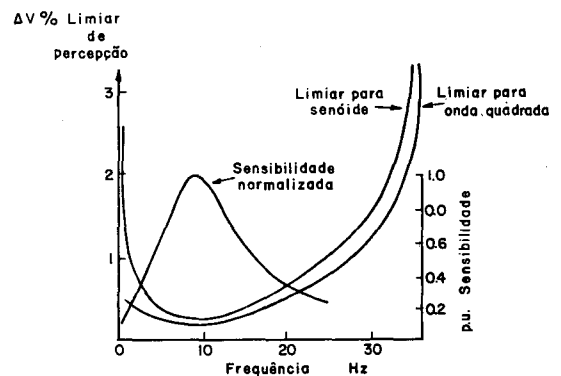


Fig. 5 - Curva de sensibilidade e limiar de percepção.

A máxima sensibilidade ocorre para flutuações em torno de 8.8Hz sendo o limiar de percepção nesse caso de 0.2% de variação da tensão. Constata-se que o olho humano é extremamente sensível às variações de tensão nessa faixa de frequências, exigindo um rigoroso controle da tensão de suprimento, para cargas do tipo fornos a arco, que produzem um espectro de variações exatamente nessa faixa.

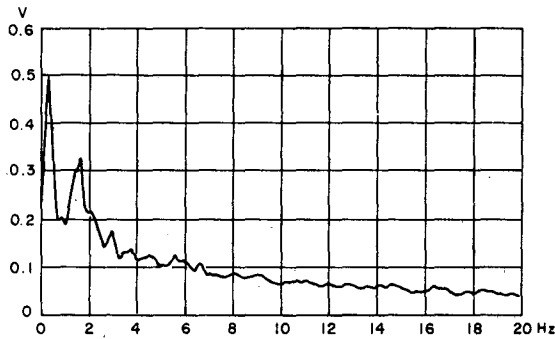


Fig. 6 - Espectro de flutuação de tensão causado por forno a arco.

- circuito de disparo dos tiristores usando optoacopladores;
- circuito de controle analógico com 2 malhas independentes;
 - . controle PID por realimentação de erro de tensão;
 - . controle direto pelas variações da corrente de carga;
 - . controle misto: PID e direto.
- interfaces para controle por microcomputador usando
 - . conversores A/D e D/A;
 - . processamento de amostras dos sinais de tensão e corrente para controle digital PID e direto;

6. ESQUEMA DE COMPENSAÇÃO IMPLEMENTADO

Para testar a eficácia do compensador reativo, tipo RCT, na redução de flutuações de tensão na faixa de percepção da cintilação luminosa, foi implementado um sistema monofásico, para laboratório (110Vca, 1KVA) contendo :

a) Compensador reativo :

- reator não saturável controlado por 2 tiristores em antiparalelo;

b) Carga variável :

- reator não saturável controlado por 2 tiristores em antiparalelo;
- circuito de disparo dos tiristores com ajuste do ponto de operação;
- gerador de ruído para simular variação da carga;
- filtro para reproduzir o espectro de forno a arco típico.

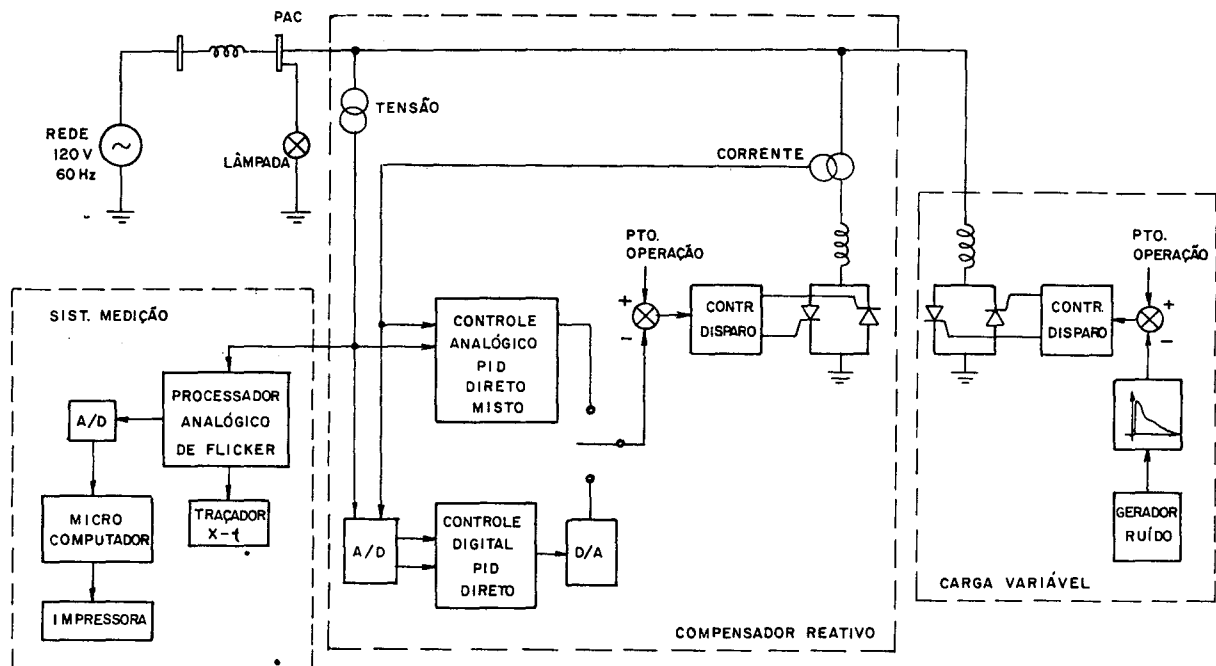


Fig. 7 - Sistema de compensação para flutuações de tensão.

c) Sistema de medição :

- processador analógico da tensão variável para obtenção da flutuação da tensão;
- filtro de ponderação para simular a característica lâmpada-olho-cérebro;
- conversor A/D para digitalizar sinal de "flicker";
- microcomputador para aquisição e processamento de amostras do sinal de "flicker";
- sistemas de gravação em fita magnética e registro gráfico em traçador X-t e impressora gráfica.

A figura 7 mostra o esquema básico do sistema desenvolvido.

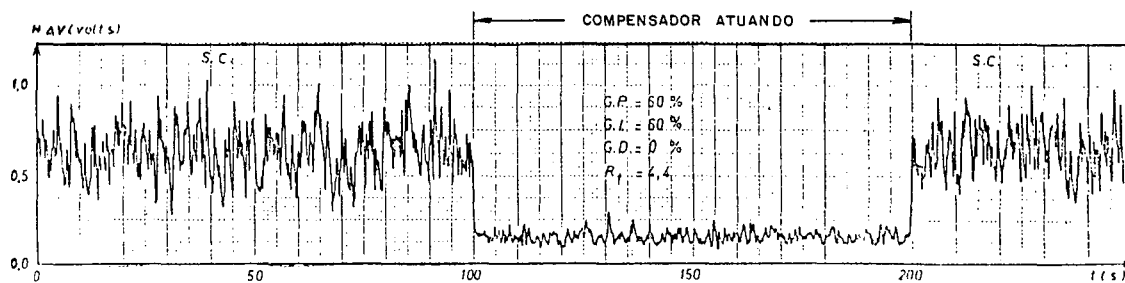
7. RESULTADOS ALCANÇADOS

Os sistemas para simulação da carga variável, compensação estática reativa e medi-

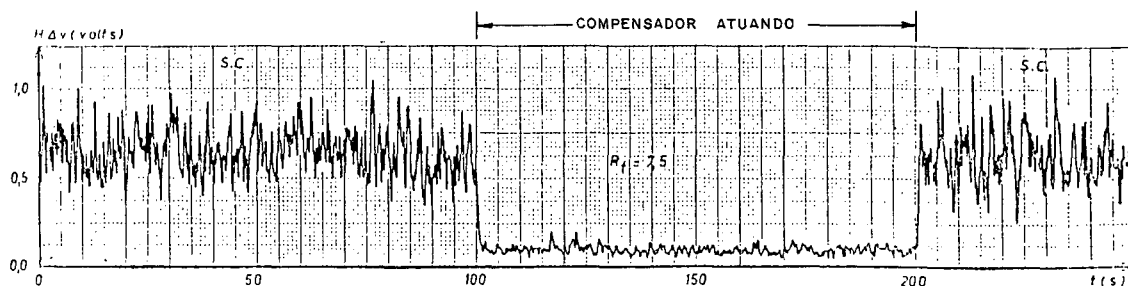
ção do efeito de cintilação foram implementados visando obter respostas para algumas questões básicas, como por exemplo :

- a) Como reproduzir, a nível de laboratório, as características de flutuação de tensão de cargas variáveis responsáveis pelo efeito da cintilação em particular ?
- b) Quais as dificuldades associadas ao processamento da tensão de suprimento para quantificar o nível de cintilação ?
- c) Qual a correlação entre os vários métodos propostos para essa medição ?
- d) Como se comportam os controles clássicos por realimentação de erro (PID) e o controle direto ("Feedforward") na redução das flutuações de tensão ?
- e) Qual o desempenho do controle digital utilizando um microcomputador para realizar as mesmas funções ?

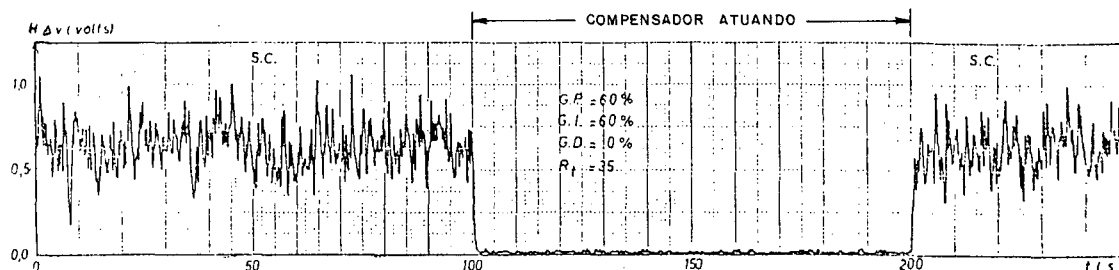
Estas são apenas algumas das questões



a) Atuação do Controle Realimentado (PID).



b) Atuação do Controle Direto.



c) Atuação do Controle Combinado (PID + Direto).

Fig. 8 - Atuação do RCT com controle analógico.

para as quais se obteve importantes subsídios. O próprio processo de implementação, especialmente na fase de desenvolvimento do protótipo, se constituiu numa sucessão de problemas a serem resolvidos. Serão tratadas aqui apenas algumas das questões básicas mencionadas acima. Para maiores detalhes ver referências [2] a [6].

Em primeiro lugar, são apresentadas curvas que mostram, na figura 8, a evolução no tempo do sinal de cintilação, associado às flutuações aleatórias da tensão geradas pela carga variável, com e sem a atuação do compensador RCT, usando o controle analógico. Resultados similares foram obtidos com o controle digital.

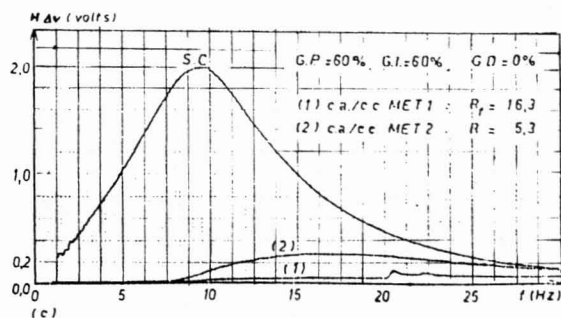
Como se pode observar, o controle direto é mais eficiente que o realimentado, e a combinação de ambos aumenta ainda mais a eficácia do controle. As razões levantadas para isso são as seguintes :

- o controle realimentado utiliza o sinal de erro de tensão como variável de controle. Isto exige ganhos diretos relativamente elevados, uma vez que as flutuações a serem atenuadas representam menos de 1% da tensão fundamental;
- o caráter aleatório das variações da carga não permitem a separação de outras fontes de ruídos;
- o controle direto monitora a corrente da carga variável para gerar o sinal de controle. Uma vez que as excursões da corrente podem alcançar 100%, os ganhos desse controle são baixos e os ruídos externos passam a ser menos significativos;
- a alta eficiência do controle combinado resulta do fato do controle realimentado e direto serem independentes e, portanto, terem atuações complementares.

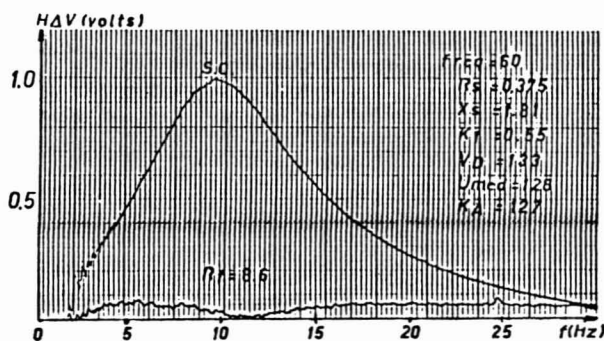
A figura 9 mostra o espectro de cintilação luminosa contido nas flutuações de tensão antes e depois da compensação pelo RCT, utilizando controle analógico e digital.

Pode-se notar que a eficácia do RCT é muito boa em toda a faixa de percepção de cintilação (0 - 30Hz). Isto mostra que há possibilidade de resposta em meio ciclo de 60Hz para o controle de potência reativa através do RCT, o que é muito mais rápido do que a capacidade de resposta de qualquer outro dispositivo, particularmente dos compensadores síncronos, que não respondem em menos de 20 - 30 ciclos.

Pode-se verificar ainda que o controle digital, usando um microcomputador de 8 bits e frequência de relógio de apenas 1MHz, praticamente conferiu ao controle direto o mesmo desempenho do controle analógico. Uma vantagem do controle por microcomputador, que ficou evidente pela pesquisa, é a possibilidade de se realizar a supervisão das 3 fases



a) Atuação do Controle Analógico (PID + Direto).



b) Atuação do Controle Digital (Direto).

Fig. 9 - Controles analógico e digital do RCT.

(sistema trifásico) consecutivamente (sequenciamento no tempo) pelo mesmo controlador no caso de carga variável desequilibrada, o que não é possível com o controle analógico, que exigiria um controlador para cada fase.

8. CONCLUSÕES

Neste artigo se procurou mostrar que muitos dos problemas enfrentados hoje pela operação de SEE podem ser minimizados através do controle e compensação adequada da potência reativa. Em geral esse controle pode e deve ser feito próximo do local de origem do problema. Existe tecnologia disponível hoje que permite que se faça esse controle de forma precisa, rápida e em grande escala. Esse é um campo no qual as áreas de conhecimentos básicos acerca dos dispositivos de energia elétrica, de eletrônica de potência, de processamento de sinais e de controle de processos podem se associar para produzir um domínio tecnológico que nos custará cada vez mais caro fora do país.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, M.O. e outros, (1987). "Influência do Fator de Potência dos Consumidores no Desempenho dos Sistemas Elétricos". IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. A ser apresentado em B. Horizonte.
- Benavides, J.E., (1986). Redução de Flutuações de Tensão por Compensação Reativa Usando Reator Controlado por Tiristores. Tese de Mestrado, Fac. Eng. Elétrica, UNICAMP.
- Borjas, R.M., (1987). Compensador de Reativos tipo RCT, Controlado por Microcomputador. Tese de Mestrado, Fac. Eng. Elétrica, UNICAMP.
- Deckmann, S.M., (1986). "Compensação de Cargas Especiais". Relatório sobre Projeto com Apoio da FAPESP - Fundação de Apoio à Pesquisa de São Paulo.
- Deckmann, S.M.; Benavides, J.E., (1986). "Compensação do Efeito "Flicker" usando Reator Controlado por Tiristores". 6º Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, pp. 859-864.
- Deckmann, S.M.; Rocco, A., (1986). "Medição do Efeito "Flicker" pelo Método UIE". 6º Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, pp. 865-869.
- Miller, T.J.E., (1982). Reactive Power Control in Electric Systems, J. Wiley & Sons, New York.
- Steinmetz, C.P., (1917). Theory and Calculation of Electric Circuits, McGraw-Hill, New York.
- UIE Disturbance Study Committee, (1982). "UIE Flickermeter - Functional and Design Specifications".