

SILVEIRA, JULIO C. PORTELLA PROF.
CAMACHO, JOSÉ ROBERTO PROF.
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RESUMO

Levando-se em conta a crescente utilização dos compensadores estáticos de potência reativa nos sistemas de potência, este trabalho apresenta alguns aspectos básicos do modelamento e simulação digital, de compensador estático a tiristores (RCT). Apresentando resultados da variação de parâmetros do próprio compensador e de características do sistema de potência.

INTRODUÇÃO

Os compensadores de energia reativa (denominados apenas compensadores na discussão a seguir) são dispositivos que atuam de maneira a manter constante a tensão em seus terminais, alterando convenientemente a absorção ou fornecimento de energia reativa.

Um compensador ideal atua sem atraso, sob faixa ilimitada e de forma contínua e controlada. Tal compensador pode ser representado pela característica tensão-corrente da figura 1.

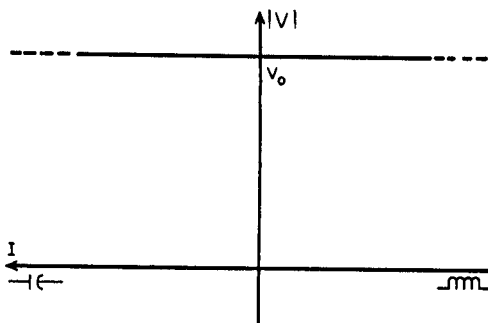


Figura 1 - Característica tensão-corrente de um compensador ideal.

Compensadores de características reais apresentam limites na faixa de compensação, retardo na atuação e estatismo crescente na direção indutiva como mostra a figura 2.

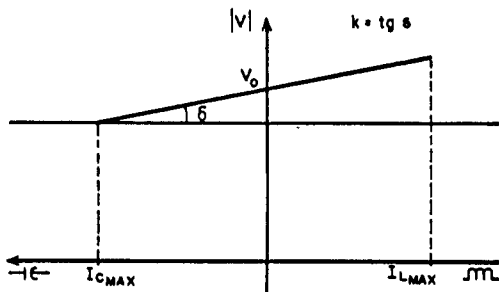


Figura 2 - Característica tensão-corrente de um compensador real.

O estatismo é um compromisso entre a potência do compensador e a variação de tensão que pode ser compensada. Além disso, permite a operação em paralelo de diversos compensadores.

Existem diversos dispositivos que reproduzem a característica da figura 2. Este trabalho analisa o compensador estático do tipo reator controlado a tiristores.

1.- COMPENSADOR DO TIPO REATOR CONTROLADO A TIRISTORES

Este tipo de compensador consta de uma reatância cuja corrente é controlada por tiristores ligados em anti-paralelo conforme mostra esquematicamente na figura 3.

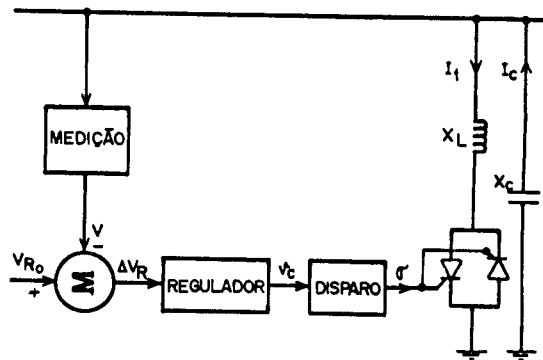


Figura 3 - Esquema básico de um compensador do tipo reator controlado a tiristores.

Se é necessário o fornecimento de reativos, um capacitor é ligado em paralelo com o conjunto bobina-tiristores.

A figura 4 mostra as formas de onda de tensão e corrente para ângulos de disparo (α) e condução (σ) dos tiristores.

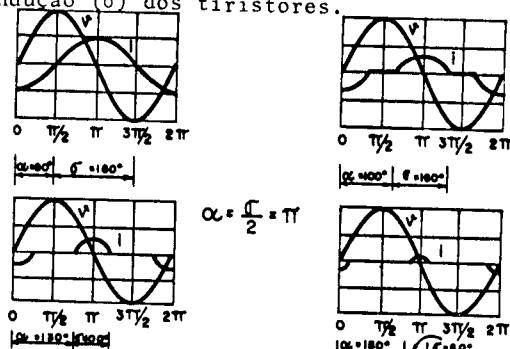


Figura 4 - Formas de onda de tensão e corrente no ramo indutivo do compensador da figura 3.

A corrente instantânea no ramo indutivo é dada por:

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t v dt \quad (1)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^t V_m \sin \omega t dt \quad (2)$$

$$i_L = \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (3)$$

$$\alpha \leq \omega t \leq \alpha + \sigma \quad (4)$$

onde:

V = tensão eficaz na barra do compensador
 $X_L = \omega L$ = reatância do ramo indutivo.

Aplicando-se análise de Fourier, a componente fundamental de corrente será dada por:

$$I_1 = \frac{(\sigma - \sigma \cos \sigma)}{\sqrt{1 - \cos \sigma}} \cdot V \quad (\text{A eficazes}) \quad (5)$$

ou

$$I_1 = B_L(\sigma) \cdot V \quad (6)$$

onde:

$$B_L(\sigma) = \frac{(\sigma - \sigma \cos \sigma)}{\sqrt{1 - \cos \sigma}} \cdot B_L \quad (7)$$

ou:

$$B_L(\sigma)_{pu} = f(\sigma) \quad (8)$$

A equação (8) mostra que alterando-se convenientemente o ângulo de disparo dos tiristores é possível se obter a característica tensão corrente da figura 5 para o compensador.

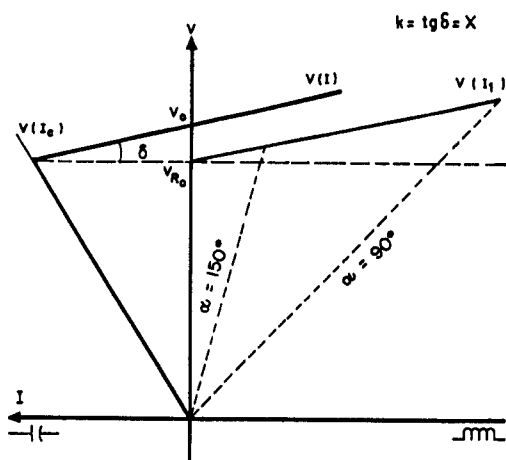


Figura 5 - Característica tensão-corrente de um compensador do tipo reator controlado a tiristores.

O sistema de controle pode ser dividido em três partes distintas (figura 3):

- medição
- regulação
- disparo.

2.- SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição recebe sinais de tensão na barra a ser controlada e, dependendo do fabricante sinais de corrente do compensador, sinais adicionais, etc... De uma maneira geral, porém, pode-se estudar as principais funções do sistema de medição independentemente de fabricantes.

Normalmente os sinais medidos são retificados através de pontes retificadoras ativas. Este tipo de retificação evita a queda de tensão existente em retificadores a diodo. A soma das saídas retificadas de cada fase fornecerá o sinal contínuo a ser enviado ao sistema de regulação. Antes porém deve ser filtrado para retirar "ripple" e frequências harmônicas indesejáveis.

Para simulação a frequências industriais o processo de medição pode ser representado por um polo de constante de tempo T_m (figura 6). Estima-se existir um retardo de 1/4 a 1 ciclo de tensão no sistema de medição dos compensadores.

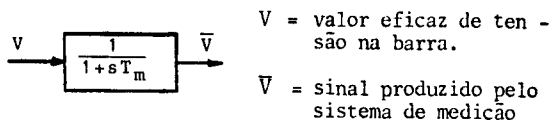


Figura 6 - Representação do atraso no sistema de medição de compensadores.

3.- SISTEMA DE REGULAÇÃO

O sistema de regulação inicia sua atuação comparando o sinal produzido pelo sistema de medição com um valor de referência (V_0) (figura 7) gerando um sinal de erro de tensão (ΔV).

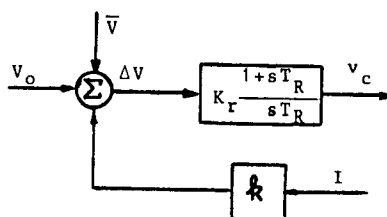


Figura 7 - Diagrama de blocos do sistema de regulação.

O controle propriamente dito é realizado, geralmente por um regulador do tipo proporcional integral. Seus parâmetros são escolhidos de maneira a se obter a melhor resposta do compensador. Em geral, K_R varia entre 3 e 6 e T_R é da ordem de 2 ciclos de tensão.

Uma vez que este tipo de regulador não pode produzir o estatismo do compensador, recorre-se à criação de um sinal proporcional à corrente do compensador.

4.- SISTEMA DE DISPARO

O sistema de disparo transforma o sinal de controle v_c em ângulos de disparo dos tiristores. Naturalmente, decorrerá certo intervalo de tempo até que se chegue ao momento oportuno do disparo dos tiristores. Este tempo é determinado estatisticamente como da ordem de 1/2 ciclo de tensão.

Em uma análise mais rigorosa, o sistema de disparo poderia ser modelado por uma função "tempo morto". A frequência industrial porém, pode-se simplificar a representação para um polo de atraso T_d . (figura 8)

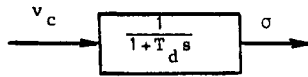


Figura 8 - Representação do sistema de disparo dos tiristores.

5.- REAÇÃO DOS TIRISTORES

A reação dos tiristores ao ângulo de disparo pode ser representada pela equação 8, que é não linear. (Figura 9)

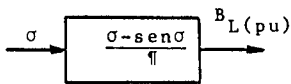


Figura 9 - Representação da reação dos tiristores.

Para evitar esta não-linearidade é introduzido no controle circuitos que formam uma função linearizadora do tipo $f^{-1}(\sigma)$. (Figura 10).

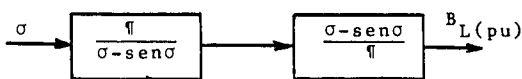


Figura 10 - Inclusão da função linearizadora.

Desta maneira a reação dos tiristores não precisa ser modelada e o sinal de saída do sistema de disparo pode ser considerado como se fosse a susceptância B_L do reator.

6.- MODELO DO COMPENSADOR

A figura 11 mostra o modelo completo do compensador. O limitador representa os limites de susceptância do compensador. Utilizando-se valores convenientes para V_0 e limites de susceptância, o capacitor fica implicitamente representados e a saída do compensador passa a ser a susceptância líquida do compensador.

A rigor, o estatismo deveria ser representado a partir de realimentação de corrente, mas como o compensador compensa pequenas variações de tensão em torno de 1pu, a saída do regulador é praticamente o valor de corrente e é usado na realimentação. Isto também é feito na prática por problemas de medição de corrente.

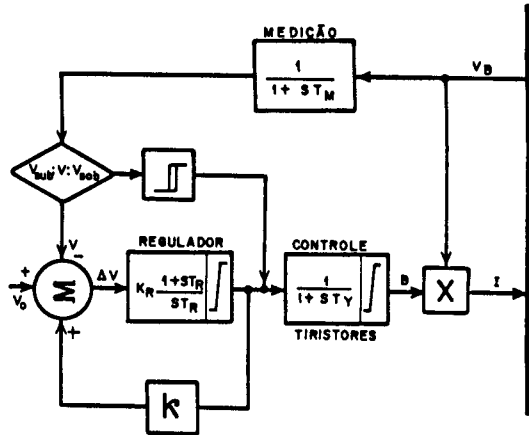


Figura 11 - Modelo completo do compensador.

7.- A REAÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA

O modelo da figura 11 foi utilizado para simular o compensador em computador digital utilizando-se a linguagem CSMP [6].

O sistema de potência foi representado pelo seu equivalente Thévenin. Em [2] demonstra-se que a tensão na barra do compensador, neste caso, é dada por:

$$V_B = V_T [1 - \frac{Q_S}{S_{CC}}]$$

onde:

- V_B = tensão na barra do compensador
- V_T = tensão de Thévenin
- Q_S = potência reativa fornecida pelo sistema e de valor igual à diferença entre a potência reativa requerida pela carga e a potência reativa fornecida pelo compensador.
- S_{CC} = capacidade de curto-circuito na barra do compensador.

8.- RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A simulação através de um programa CSMP [6], utiliza o modelo do compensador que apresenta estatismo aplicado à saída do regulador, os parâmetros de simulação, para o caso base, são:

- a capacidade de curto-circuito (S_{CC}) na barra do compensador é 1000 MVA;
- a constante de tempo da medição da tensão (T_M) é igual a 10 ms;
- a tensão na barra do compensador é 1,0pu;
- o regulador apresenta um ganho (K_R) igual a 5,0, enquanto a constante de tempo do regulador (T_R) é 32,0 ms. (2 ciclos);
- o tempo de resposta do controle e reação dos tiristores (T_Y) é igual a 10 ms;
- o estatismo do compensador (k) é nulo. Sendo que a potência base é 200 MVA.

Os casos simulados apresentam variação dos requisitos de reativo em degrau para os seguintes valores:

$$T_1 = 0,0 \text{ seg.} - Q = -60,0 \text{ MVAr}$$

$$T_2 = 0,15 \text{ seg.} - Q = 60,0 \text{ MVar}$$

$$T_3 = 0,30 \text{ seg.} - Q = 00,0 \text{ MVar}$$

desde 1982. Mestre em Ciências pela UFSC, em 1987, na área de Controle de Sistemas Elétricos.

Os perfis de tensão e potência reativa para os caso na barra do compensador são mostrados na figura 12, onde se comparam estes resultados com aquele (figura 13) em que o compensador apresenta um tempo de resposta menor para o regulador ($T_R = 8\text{ms}$) de aproximadamente 1/2 ciclo, e um outro (figura 14) em que o sistema é mais fraco, ou seja, a capacidade de curto-circuito na barra do compensador é de 500 MVA.

9.- CONCLUSÕES

Observando-se as figuras 12 e 13 percebe-se claramente que uma resposta mais rápida do regulador faz com que a tensão e a potência reativa fiquem mais oscilantes passando por valores 5% e 50% maiores, respectivamente, durante o transitório em relação ao caso base.

Na figura 14 observa-se que um sistema mais fraco faz com que a resposta do compensador seja mais oscilante passando por valores 12% maiores para tensão e 50% maiores para potência reativa, enquanto que sem se atuar nas constantes de tempo o compensador atua mais rapidamente que para o caso base.

10.- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CIGRE Working Group 1, "Static Shunt Devices for reactive power control", Paper 31-08, 1974.
- [2] Miller, T.J.E., "Reactive Power Control in Electric Systems", John Wiley and Sons, 1982.
- [3] Mathur, R.M., "Static Compensator for Reactive Power Control", Cantext Publications, 1984.
- [4] CIGRE Working Group 1, "Modelling of Static Shunt Var Systems (SVS) for Systems Analysis", Electra, Vol. 51, Março, 1977.
- [5] Mathur, R.M. et al, "Application of Static Compensators at HVDC - Terminals, Tese MSc, University of Manitoba, Setembro, 1982.
- [6] Speckhart, F.H. and Green, W.L., "A Guide to Using CSMP - The Continuous System Modelling Program"; Prentice-Hall, Inc; 1976.

11.- BIOGRAFIAS

Prof. Julio Cesar Portella Silveira

Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), MG em 1976. Mestre em Ciências pela Universidade Federal de Sta. Catarina, em 1983. Professor do Depto. Engª Elétrica da UFU, desde 1977, atualmente realizando doutoramento na UNICAMP na área de sistemas elétricos.

Prof. José Roberto Camacho

Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia desde 1979. Possui curso de especialização em Controle de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Sta. Catarina (UFSC),

APENDICE

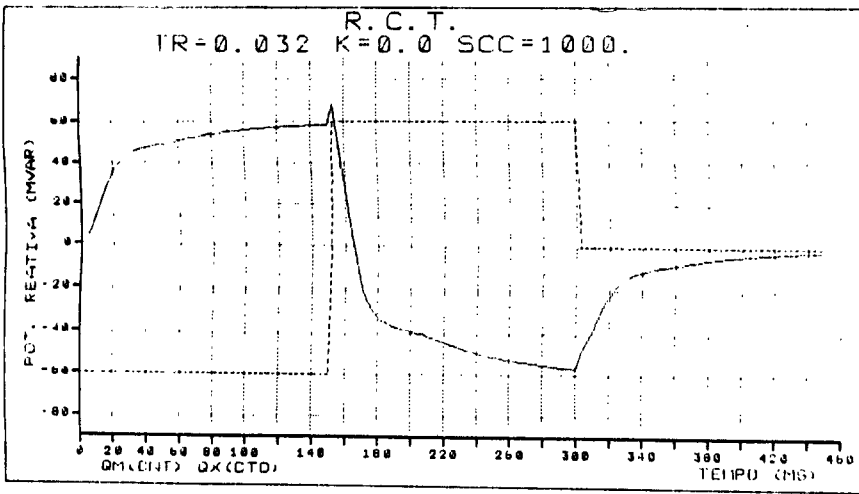


Figura 12.a -

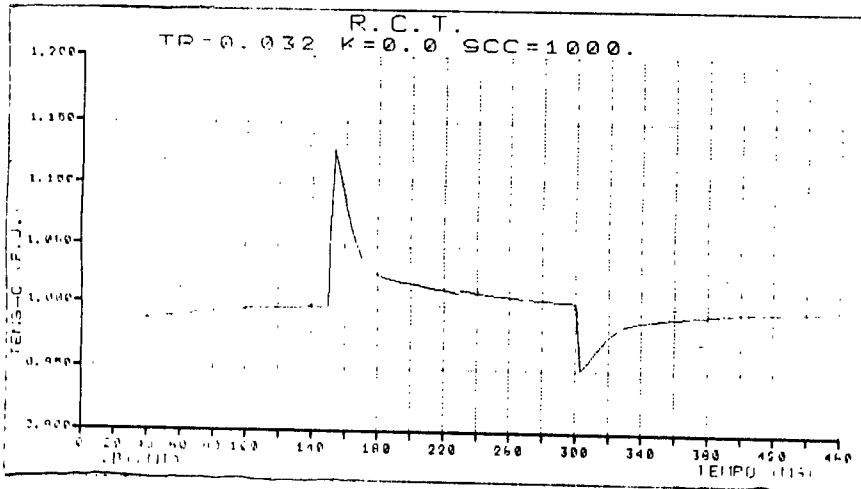


Figura 12,b -

Figura 12 - Perfis de tensão (b) e potência reativa (a) para o caso base.

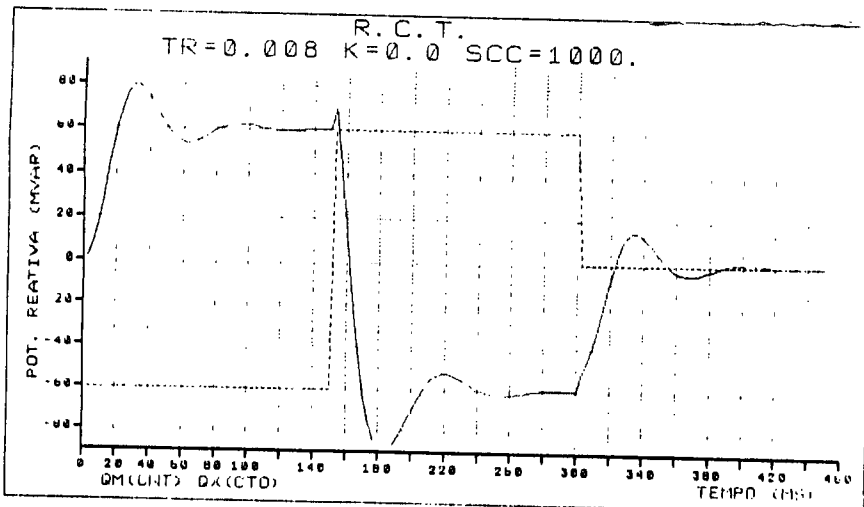


Figura 13.a -

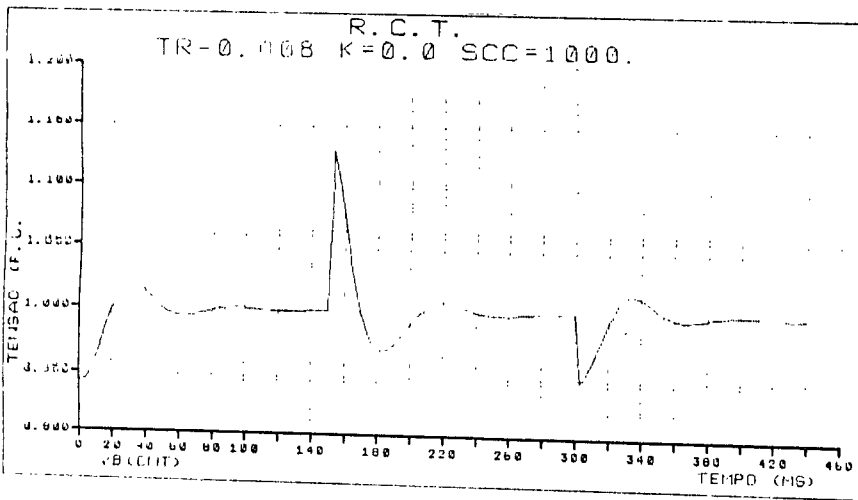


Figura 13.b -

Figura 13 - Perfis de tensão (b) e potência reativa (a) para T_R igual a 1/2 ciclo.

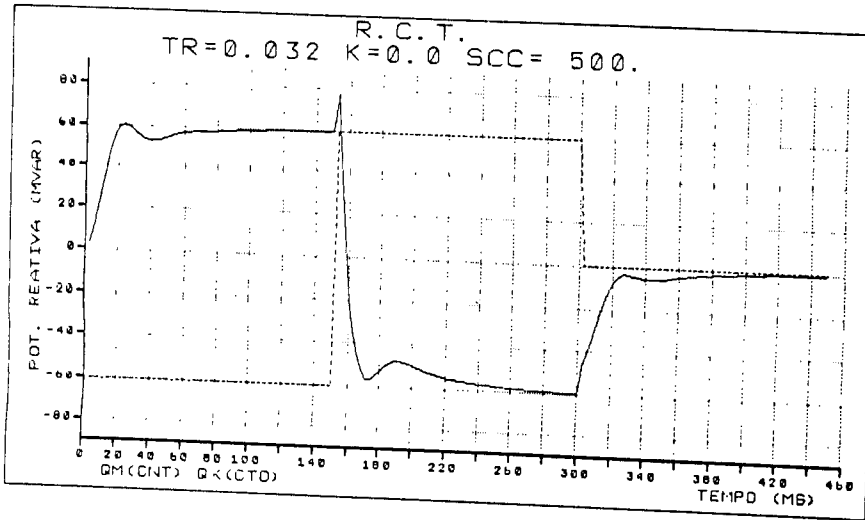


Figura 14.a -

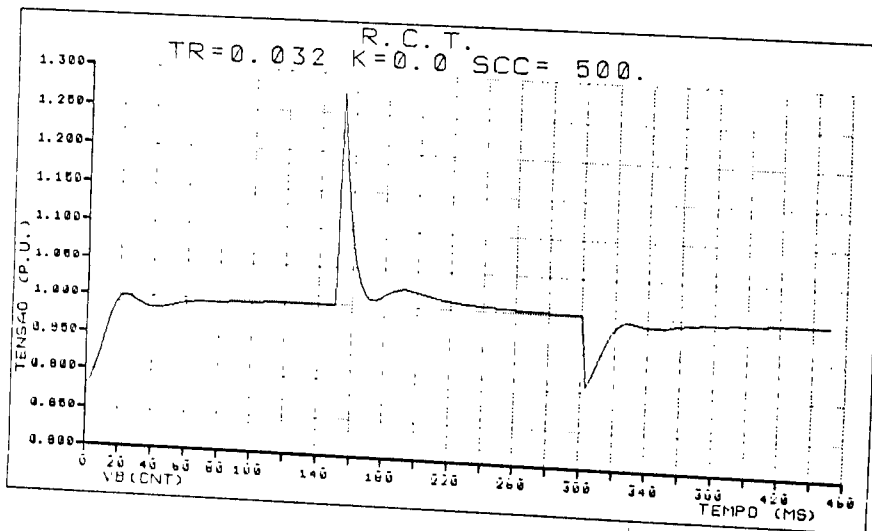


Figura 14.b -

Figura 14 - Perfis de tensão (b) e potência reativa (a) para $S_{cc} = 500$ MVA.