

unesp



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO TCSC NO
SISTEMA MULTIMÁQUINAS E
COMPARAÇÃO ENTRE LEIS DE
CONTROLE**

MARCIO LORENTZ DA COSTA

Ilha Solteira - SP

1210001688



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE MESTRADO

Análise de Desempenho do TCSC no Sistema Multimáquinas e Comparação entre Leis de Controle.

Dissertação submetida à Faculdade de
Engenharia Elétrica de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica

Autor: Marcio Lorentz da Costa

Orientador: Prof. Dr. Laurence Duarte Colvara

Ilha Solteira – SP, Fevereiro de 2006

Co. sup 456441
sup 59677

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

- C837a Costa, Marcio Lorentz da.
Análise de desempenho do TCSC no sistema multimáquinas e comparação entre leis de controle / Marcio Lorentz da Costa. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2006
69 p. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006
- Orientador: Laurence Duarte Colvara
Bibliografia: p. 68-69
1. Energia elétrica – Transmissão. 2. Sistemas de energia elétrica – Estabilidade. 3. Curtos – circuitos. 4. Redes elétricas. 5. Controle por tiristores. 6. Sistema multimáquinas.

30404002

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise de Desempenho do TCSC no Sistema Multimáquinas e Comparação entre Leis de Controle

AUTOR: MARCIO LORENTZ DA COSTA

ORIENTADOR: Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. FLÁVIO GUILHERME DE MELO LIMA

Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS/Campo Grande/MS

Data da realização: 20 de fevereiro de 2006.



Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

UNESP - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA	
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
13.03.06	28.04.06
REGISTRADO POR	TOMBO
Ailza	Te. 1668
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Uso Auto R\$ 10,00	C837a

1210001668



BCpIS - FEIS - UNESP

Dedico este trabalho aos
meus pais José Ribas e
Neusa Maria.

BCplS - FEIS - UNESP



Agradecimentos

Ao meu bom Deus, pois sem ele nada aconteceria.

Aos meus Pais, pelo carinho, afeto e apoio.

A todos meus familiares, pelo carinho sempre presente.

Ao meu Orientador pela sua paciência, incentivo e assistência constante.

A todos meus amigos que de uma forma ou de outra me incentivaram a
concluir este curso.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Fenômenos da Estabilidade	3
1.2 Dispositivos FACTS	7
1.3 Recentes desenvolvimentos e problemas	8
1.4 O presente estudo e Expectativas de resultados	10
2. Representação do Sistema Elétrico de Potência	11
2.1 Rede Elétrica	11
2.1.1 Máquina Síncrona	11
2.1.2 Regulador Automático de Tensão (RAT)	13
2.2 Sistema de Potência multimáquinas.	16
2.2.1 Sistema de Potência multimáquinas com estrutura da rede preservada	16
3 Os dispositivos FACTS	20
3.1 Compensador série controlado a Tiristor ("TCSC – Thyristor Controlled Series Compensator")	21
3.1.1 Análise dos dispositivos FACTS instalados no sistema de potência	23
3.1.1.1 Modelo do sistema e características de transmissão	23
4. Formas de Compensação série da linha	28
4.1 Sinais de Entrada	29
4.1.1. Desvio do fluxo de potência na linha	29
4.1.2. Desvio da magnitude da corrente na linha	29
4.1.3. Desvio da magnitude da queda de tensão na linha	30
4.2.1. Compensação Proporcional ou Pura	30
4.2.2. Compensador com compensação de fase (lead-lag)	30
4.2.3. Controlador PI	35
5. Simulações	37
5.1. Compensação fixa (ou permanente)	42
5.2. Compensação Proporcional.	45
5.2.1. Entrada: Desvio do fluxo de potência elétrica (caso 03)	45
5.2.2. Entrada: Desvio da magnitude da corrente (caso 04)	47
5.2.3. Entrada: Desvio da magnitude da tensão (caso 05)	49
5.3. Compensação de fase.	51
5.3.1. Entrada: desvio do fluxo de potência elétrica (caso 07)	51
5.3.2. Entrada: desvio magnitude da corrente (caso 08)	54
5.3.3. Entrada: Desvio da magnitude da queda de tensão (caso 09)	56
5.4. Compensador com Controlador PI.	59
5.4.1. Entrada: Desvio do fluxo de potência elétrica (caso 10)	59
5.4.2. Entrada: Desvio da magnitude da corrente (caso 11)	61
5.4.3. Entrada: Desvio da magnitude da queda de tensão (caso 12)	63
6. Conclusão	66
7. Referências.	68

Resumo: Este trabalho faz uma análise de desempenho de Sistemas de Energia Elétrica multimáquinas sob a atuação de dispositivo Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS), considerando especificamente o “Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)” com comparação de diversas leis de controle com vistas à estabilidade. Diversas estruturas do controlador são consideradas, assim como diferentes sinais de entrada e se estabelecem comparações entre os resultados obtidos em termos de oscilações eletromecânicas após uma perturbação do sistema.

Abstract: The multimachine power system dynamic performance is considered as affected by the action of a Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) device, approaching specifically the “Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)”. Different control law structures are taken into account as well as different input signals and comparisons are made among the various oscillations curves results.

1. Introdução

A estabilidade no sistema de potência pode ser amplamente definida como a propriedade que permite que ele permaneça num estado de equilíbrio em condições operacionais normais e retornar a este estado após uma perturbação.

A instabilidade num sistema de potência pode ser manifestada de diversas formas dependendo da configuração do sistema e do modo de operação. Tradicionalmente, a questão da estabilidade é tratada equivalentemente à questão do sincronismo. O sistema de potência utiliza fundamentalmente máquinas síncronas para a geração de energia elétrica, e uma condição necessária para satisfazer a operação do sistema é que todas as máquinas síncronas permaneçam em sincronismo, isto é, "em passo". Entretanto, quando sujeito a alteração do estado normal de operação, seja pequena, estudada sob o título estabilidade dinâmica, seja grande, estudada sob o título estabilidade transitória, há perturbação do equilíbrio e conseqüente oscilação, manifestada através das dinâmicas dos ângulos do rotor do gerador e das relações potência ângulo.

Instabilidade também pode ser encontrada sem a perda de sincronismo. Por exemplo, um sistema que consiste de um gerador síncrono que alimenta uma carga de motor de indução por uma linha de transmissão pode ficar instável devido a colapso de tensão de carga. Manutenção de sincronismo não é prioridade neste caso; ao invés, a preocupação é estabilidade do controle de tensão. Esta forma de instabilidade também pode ocorrer em cargas supridas por um grande sistema.



Pequenas perturbações na forma de variações normais de carga acontecem continuamente, e o sistema se ajusta autonomamente para diversas condições. O sistema deve ser capaz de operar satisfatoriamente sob essas condições e suprir ininterruptamente as cargas.

O sistema também deve ser capaz de suportar perturbações de natureza severa, tais como curto-circuitos nas linhas de transmissão, perda de grandes geradores ou da capacidade transmissão, ou perda da conexão entre dois subsistemas. O sistema responde a uma perturbação envolvendo muitos equipamentos. Por exemplo, um curto-circuito numa área crítica, seguido por seu isolamento via proteção feita por relés causará variação no fluxo de potência, velocidade do rotor das máquinas, nas tensões das barras e conseqüentemente:

- A variação da tensão influencia tanto nos geradores, como na regulação da tensão do sistema de transmissão;
- A variação da velocidade influencia no governador da máquina primária;
- As variações nos carregamentos da linha principal podem influenciar nos controles de geração;
- As variações na tensão e na frequência afetarão as cargas do sistema na variação das condições dependendo de suas características individuais.

Além do mais, dispositivos usados para proteger equipamentos individuais podem responder a variações nas condições operacionais do sistema e assim afetando o desempenho do próprio sistema. Numa dada situação, entretanto, as respostas de apenas uma quantidade limitada de equipamentos pode ter conseqüência significativa. Por esta razão, muitas



suposições são feitas usualmente para simplificar o problema e para focar o elemento que influencia e o tipo específico do problema de estabilidade.

Estabilidade de ângulo é a propriedade das máquinas síncronas interconectas a um sistema de potência que as faz permanecer em sincronismo. O problema de estabilidade envolve o estudo das oscilações eletromecânicas inerentes aos sistemas de potência. O fator fundamental neste problema é a maneira pela qual as potências desenvolvidas das máquinas síncronas variam enquanto oscilam os seus rotores.

1.1 Fenômenos da Estabilidade

Sob condições de regime permanente, existe um equilíbrio entre a entrada de torque mecânico e a saída de torque elétrico de cada máquina, e a velocidade permanece constante.

Se no sistema em equilíbrio ocorrer uma perturbação, isso resultará em aceleração ou desaceleração de cada rotor das máquinas de acordo com as leis de movimento de um corpo rotacional. Se um gerador temporariamente girar mais rápido do que outro, a posição angular de seu rotor avançará em relação ao da máquina mais lenta. Dentro de certos limites, o aumento de defasagem angular corresponde a um acréscimo de potência elétrica transmitida implicando em um maior torque líquido restaurativo do equilíbrio. Além desse limite, um aumento na separação angular é acompanhado por uma diminuição do fluxo de potência; e como consequência este aumento da separação angular favorece a instabilidade.

A perda de sincronismo pode ocorrer entre uma máquina e o resto do sistema ou entre grupos de máquinas, sendo que o sincronismo pode ser mantido entre máquinas de um mesmo grupo depois da separação dos outros.



A interconexão de máquinas síncronas é de alguma maneira análoga a vários carros correndo, sendo cada um ligado a outro por uma conexão elástica ou faixa de borracha. Os carros representam o rotor das máquinas síncronas e as faixas de borracha são análogas às linhas de transmissão. Quando todos os carros correm lado a lado, isto é, em linha, os elásticos permanecem relaxados. Se uma força acelerante fosse aplicada num dos carros isto causaria um aumento temporário da velocidade, os elásticos conectados aos outros carros se esticariam; isto tenderia a uma redução de velocidade do carro mais rápido e um aumento velocidade dos outros carros, e vice-versa, ocasionando uma oscilação relativa entre os carros. Isso ocorreria até que todos os carros corressem na mesma velocidade mais uma vez, isto é, voltassem ao sincronismo. Se o puxão em um dos elásticos excedesse sua capacidade de resistência, ele se romperia e um ou mais carros se afastariam para longe dos outros carros.

Na estabilidade dinâmica com o sistema de energia elétrica, a variação no torque elétrico de uma máquina síncrona seguindo uma perturbação pode ser decomposta em dois componentes [1], como:

$$\Delta T_E = T_S \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (1.1)$$

onde $T_S \Delta \delta$ é a componente de torque em fase com a perturbação do ângulo do rotor $\Delta \delta$ e é referido como componente de torque de sincronismo; T_S é o coeficiente de torque de sincronismo. E $T_D \Delta \omega$ é a componente de torque em fase com o desvio de velocidade $\Delta \omega$ e é referido como a componente de torque de amortecimento; T_D é o coeficiente de torque de amortecimento.

A estabilidade do sistema depende da existência de ambos os componentes de torque de cada máquina síncrona. A falta de suficiente torque de sincronização resulta em instabilidade do tipo crescimento aperiódico do



ângulo do rotor. Por outro lado, a falta de torque de amortecimento resulta em instabilidade oscilatória.

Por conveniência, em análises e para ganhar uma compreensão clara sobre a natureza dos problemas de estabilidade, é usual caracterizar o fenômeno de estabilidade do ângulo do rotor em duas categorias:

a) **Estabilidade dinâmica** é a habilidade do sistema de potência de manter o sincronismo sob pequenas perturbações. Tais distúrbios ocorrem continuamente no sistema, por causa de pequenas variações na carga e na geração. Estes distúrbios são considerados suficientemente pequenos para que possam ser representados por meio de linearização das equações do sistema. Instabilidade pode resultar em duas formas: (1º) aumento do ângulo do rotor no ponto de equilíbrio no devido à insuficiência de torque de sincronismo, ou (2º) aumento de amplitude das oscilações rotacionais do rotor devido a insuficiência de torque de amortecimento. A resposta natural do sistema para pequenas perturbações depende de inúmeros fatores, incluindo as condições iniciais de operação e o tipo de controle de excitação usado no gerador. Para uma conexão radial do gerador num grande sistema de potência, na ausência de um regulador automático de tensão, se houver instabilidade, esta é devida à insuficiência de torque de sincronização. Isto resulta em instabilidade por modos não oscilatórios. Com o regulador de tensão agindo continuamente, o problema da estabilidade de pequena perturbação está associado ao amortecimento das oscilações do sistema. A instabilidade normalmente se dá por crescimento da amplitude das oscilações.

A instabilidade dinâmica é em grande parte um problema de insuficiência de amortecimento de oscilações. A estabilidade dos seguintes tipos de oscilação é de interesse:



- *Modo local*: incluem-se nesta classificação os modos de oscilação associados com as oscilações de unidades geradoras em relação ao resto do sistema de potência. O termo *local* é usado devido ao fato de as oscilações ficarem localizadas em uma área ou numa pequena parte do sistema de potência.

- *Modo Interárea*: nesta classificação estão as oscilações de máquinas em uma parte do sistema contra máquinas em outras partes. Eles são causados por dois ou mais grupos de máquinas unidas, sendo interconectados por linhas fracas.

- *Modos de Controle*: são associados com unidades geradoras e outros controles.

- *Modos torsionais* ou Intra-Planta: são associados com o gerador-turbina, sustentado pelo sistema de componentes rotacionais, isto é, são associados às oscilações que ocorrem entre os geradores de uma mesma usina.

b) **Estabilidade Transitória** é a habilidade do sistema de potência manter o sincronismo quando sujeito a um severo distúrbio transitório. O resultado da resposta do sistema envolve larga discussão sobre o ângulo do rotor do gerador e é influenciado por uma relação não linear de potência-ângulo. A estabilidade depende da condição inicial de operação do sistema e da severidade do distúrbio. Habitualmente, o sistema é alterado de forma que a operação de regime permanente pós falta fique diferente de antes da perturbação.

Perturbações de extensa variação de ângulo podem ocorrer no sistema. O sistema é projetado e operado para ser estável para um conjunto selecionado de contingências e as contingências habitualmente consideradas são curto-circuitos de diferentes tipos: fase-terra, fase-fase-terra, ou trifásico. Mais frequentemente eles acontecem em linhas de transmissão, mas ocasionalmente



falta em barras ou transformadores também podem ser consideradas. A eliminação da falta (curto-circuito) é suposta por meio da abertura de chaves apropriadas para isolar o elemento com defeito. Em alguns casos, pode ser adotada alta-velocidade de religamento [1].

Os Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica tradicionais se caracterizam por serem, em certo sentido, rígidos. Significa que os equipamentos e/ou dispositivos estão ou não conectados, e, uma vez conectados, se caracterizam por impedâncias fixas, vindo daí a consideração de rigidez.

Por outro lado, se as linhas de transmissão forem dotadas de alguma flexibilidade e, se esta flexibilidade puder adicionalmente ser controlada, abre-se a possibilidade de aumentar a capacidade de o sistema absorver eventuais impactos, sejam pequenos ou severos. Como consequência, pode-se evitar ou pelo menos postergar a necessidade de investimentos na construção de novas linhas (rígidas) como reforço do sistema de transmissão. Vem neste sentido a inclusão de dispositivo de tecnologia FACTS (**F**lexible **A**C **T**ransmission **S**ystem - Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada).

1.2 Dispositivos FACTS

A tecnologia de FACTS fornece novas oportunidades para uso e controle do sistema. Os dispositivos FACTS mais frequentemente representados são SVC (**S**tatic **V**ar **C**ompensator - Compensador Estático de Reativos), TCSC (**T**hyristor **C**ontrolled **S**eries **C**apacitor - Compensador Série Controlado a Tiristor) e PS (**P**hase **S**hifter - Defasador), os quais estão ou logo estarão em uso no Brasil. Os modelos empregados para representação de dinâmica dos dispositivos FACTS são essencialmente similares ao modelo empregado para representação de HVDC (**H**igh **V**oltage **D**irect **C**urrent – Alta



Tensão em Corrente Contínua) devido à similaridade da tecnologia e dos componentes empregados.

Entretanto, o FACTS se comporta de maneiras diversas em virtude de diferentes elementos e configurações. Por exemplo, o SVC em serviço pode ser modelado como compensadores TCR+FC (Thyristor Controlled Reactors – Reatores Controlados a Tiristor, e Fixed Capacitor – Capacitor Fixo). O circuito principal do TCSC também é TCR. Embora o circuito básico de energia de um TCR seja padrão, o método de seu controle e a disposição das variáveis de controle de compensador completo varia de sistema para sistema. Porém os elementos fundamentais dos modelos de FACTS são compostos de modelos de circuitos de energia e modelos de controle, no qual o modo de construção é similar ao HVDC [6].

1.3 Recentes desenvolvimentos e problemas

Os desenvolvimentos tecnológicos após a Segunda Guerra Mundial com crescimento industrial acelerado, resultaram em um aumento dramático na demanda de energia elétrica e na capacidade industrial de expansão entre os anos cinquenta e o começo dos anos setenta. Este enorme crescimento na demanda de energia foi respondido por maior expansão de geração, melhoria de transmissão, por formações regionais de pólos de energia e aumento de interconexões de sistemas de potência individuais.

As condições socioeconômicas tinham começado a mudar inesperadamente durante os anos setenta com a indústria governamental, uma série de dificuldades econômicas, ambiental e problemas sociais. O embargo de petróleo em meados dos anos setenta, a oposição pública pela energia nuclear, e o foco social em ar puro e outros problemas relativos ao ambiente conduziram para considerável aumento no custo operacional e intervenção



governamental. A legislação nacional de energia Americana, tomou várias iniciativas relativas ao ambiente e os outros regulamentos de restrição entraram em efeito. O desenvolvimento de energia alternativa como energia solar, geotérmica, óleo de xisto e outras foram iniciados. Ao mesmo tempo os Estados Unidos sofreram uma grande reestruturação: larga concentração de indústrias que estavam fechadas e a produção era distribuída para pequenas indústrias em diferentes localidades. Esta combinação com positivas mudanças demográficas, resultou em uma considerável troca de demanda de energia.

Como decorrência, surgiu a necessidade de recolocação ou construção relativamente rápidas de novas usinas de geração e linhas de transmissão para igualar as diferenças geográficas de perfil de demanda de energia e acomodar uma estrutura temporária do custo de combustível.

No sistema interconectado “contraído” a energia às vezes seria entregue a partir de um local de geração distante, pelos sistemas de transmissão para uma área de carga determinada, muitas vezes conduzida para um descontrole e indesejável fluxo de potência, o qual freqüentemente sobrecarregava algumas linhas, causando sobre aquecimento e problemas de regulação de tensão. O consumidor final também era exposto a dificuldades causadas pela contingência de perda de energia importada e conseqüentemente tinha uma intensa sobrecarga nos sistemas locais, conduzindo a um decaimento da tensão, podendo inclusive levar a um possível colapso da tensão. Estes problemas levaram ao uso de compensação por capacitores, possibilitando assim assegurar a tradicional margem de estabilidade sem o reforço da transmissão pela construção de novas linhas.

A exigência de suporte de tensão, garantia de estabilidade transitória, expansão da rede interconectada, e as restrições impeditivas para construção



de novas linhas, bem como a considerada economia, também conduziu para o crescimento de aplicações de compensadores de controle variável em sistemas de transmissão a partir de meados dos anos setenta [2].

1.4 O presente estudo e Expectativas de resultados

A literatura especializada tem apresentado várias abordagens [5, 6, 7, 8, 10, 13, 14, 15, 16, 17] de implementação e estudo de desempenho de dispositivos FACTS e diversas alternativas de dispositivos, estruturas e leis de controles já foram propostas, como compensação proporcional, de fase e até mesmo o controlador PI. No presente trabalho objetiva-se o estudo da representação do sistema elétrico de potência incluindo dispositivos FACTS com diversas leis de controle, abordando a influência dos FACTS e suas leis de controle sobre o desempenho dinâmico e transitório do sistema. Utiliza-se simulação digital do sistema de energia elétrica multimáquinas destacando-se particularmente neste estudo o dispositivo FACTS do tipo TCSC. Focaliza-se sua influência sobre o comportamento dinâmico do sistema, particularmente quanto à natureza do próprio dispositivo e as leis de controle nele empregadas. Procura-se identificar dentre as alternativas consideradas, qual a melhor para implementação e estudos futuros.



2. Representação do Sistema Elétrico de Potência

Neste capítulo são descritos os modelos utilizados para a rede, a máquina síncrona e controles, através da representação por variáveis de estado e finalmente o sistema de potência multimáquinas.

2.1 Rede Elétrica

Considerando a rede de energia em regime permanente, sua expressão genérica é [11]:

$$I = Y \cdot E \quad (2.1)$$

Sendo: I = vetor injeções de correntes de barra;

E = vetor tensões na barra;

E também: $Y = G + jB$

Sendo: G = matriz condutância de barra;

B = matriz susceptância de barra;

2.1.1 Máquina Síncrona

Para a máquina síncrona, considerando modelo de dois eixos (δ , ω , e'_d e e'_q), como no diagrama fasorial mostrado na Figura 2.1, as equações de estado podem ser escritas como[11]:

$$\dot{\delta} = \omega \quad (2.3)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (-D\omega + P_m - P_e) \quad (2.4)$$

$$T'_{do} E'_q = -E'_q - (x_d - x'_d) i_d + E_{fd} \quad (2.5)$$

$$T'_{qo} E'_d = -E'_d - (x_q - x'_q) i_q \quad (2.6)$$

sendo:

δ = posição angular medida em relação a um eixo que gira à velocidade síncrona;



ω = desvio de velocidade angular da máquina síncrona com relação à velocidade síncrona;

D = constante de amortecimento [s];

E'_d = tensão proporcional ao enlace de fluxo de eixo direto;

E'_q = tensão proporcional ao enlace de fluxo de eixo quadratura;

E_{fd} = tensão de excitação;

i_d = corrente de eixo direto nos terminais da máquina;

$$M = \frac{2H}{2\pi f_o};$$

P_e = potência elétrica entregue pela máquina síncrona;

P_m = potência mecânica de entrada (fornecida a máquina síncrona);

T'_{do} = constante de tempo de circuito aberto de eixo direto;

T'_{qo} = constante de tempo de circuito aberto de eixo em quadratura;

x'_d = reatância transitória de eixo direto;

x_d = reatância de eixo direto;

x'_q = reatância transitória de eixo em quadratura; e

x_q = reatância de eixo em quadratura.

A potência elétrica (P_e) é dada por:

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (2.7)$$

em que:

$$v_d = E'_d + x'_q i_q \quad (2.8)$$

$$v_q = E'_q - x'_d i_d \quad (2.9)$$

sendo:

v_d = tensão de eixo direto no terminal da máquina; e

v_q = tensão de eixo em quadratura no terminal da máquina.

portanto:



$$P_e = E'_d i_d + E'_q i_q + (x'_q - x'_d) i_d i_q \quad (2.10)$$

Para as máquinas de rotor liso:

$$x'_q \cong x'_d \quad (2.11)$$

Então:

$$P_e = E'_d i_d + E'_q i_q \quad (2.12)$$

Considerando-se uma máquina síncrona conectada a uma barra infinita de tensão V por meio de um sistema de transmissão de reatância efetiva x_e e sendo δ a posição angular do rotor em relação à barra infinita, tem-se [11]:

$$i_q = \frac{V \sin \delta - E'_d}{x_e + x'_q} \quad (2.13)$$

$$i_d = \frac{-V \cos \delta + E'_q}{x_e + x'_d} \quad (2.14)$$

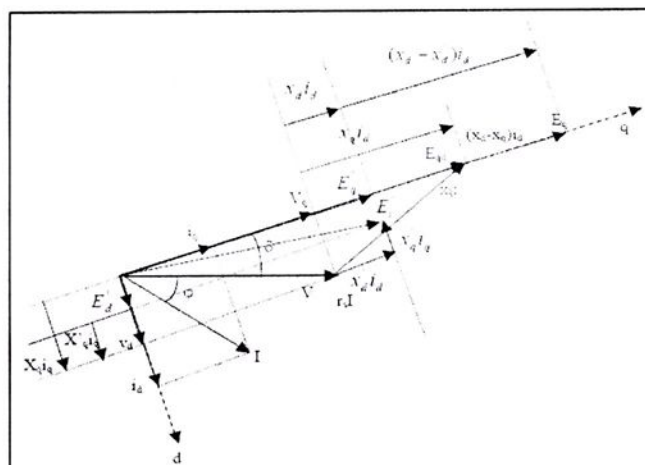


Fig 2.1 – Diagrama Fasorial de MS para modelo de dois eixos.

2.1.2 Regulador Automático de Tensão (RAT)

É oportuno destacar que, para estudo de estabilidade de oscilações eletromecânicas, usualmente se emprega um modelo simplificado que se

presta bem para representar o comportamento na faixa de frequência de interesse, que é da ordem de 0,2 a 2 Hz. Este modelo é simplesmente um bloco de primeira ordem com um ganho K_R e uma constante de tempo T_R , como se mostra a seguir. [11]

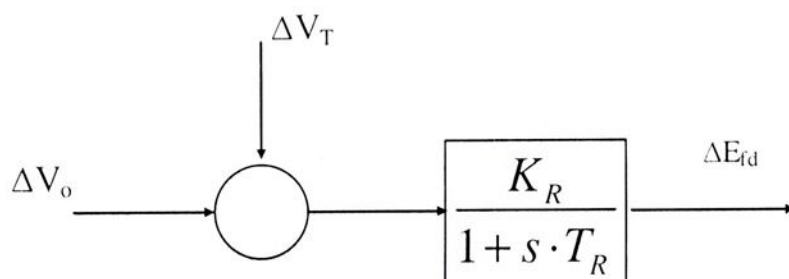


Fig. 2.2 Regulador Automático de Tensão

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{1}{T_R} [-\Delta E_{fd} + K_R (\Delta V_o - \Delta V_T)] \quad (2.16)$$

K_R = ganho transitório (modelo reduzido do RAT);

T_R = constante de tempo do RAT;

ΔV_T = variação da tensão terminal;

ΔV_o = variação da tensão terminal no ponto de equilíbrio; e

ΔE_{fd} = variação da tensão de campo.

2.1.3 Regulador de Velocidade (RV)

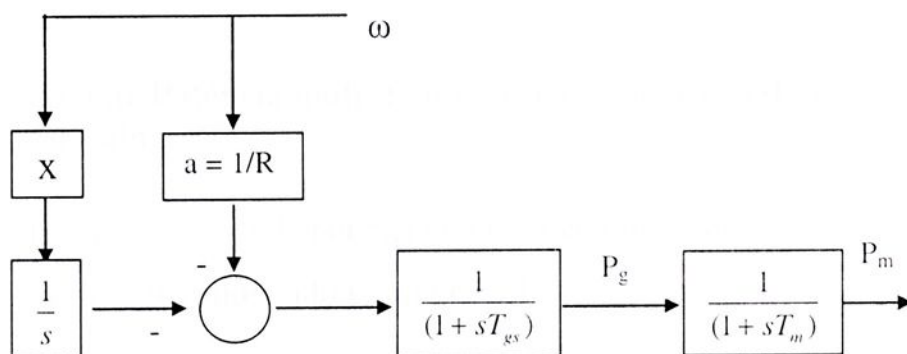


Fig. 2.3 Regulador de Velocidade

As equações de estado relativas ao RV, cujo diagrama em blocos é visto na Fig. 2.3, são dadas por [11]:

$$\dot{p}_g = \frac{-p_g - \alpha \cdot \omega + y_1}{T_g} \quad (2.17)$$

$$\dot{p}_m = \frac{-p_m + p_g}{T_m} \quad (2.18)$$

$$\dot{y}_1 = -x \cdot \omega \quad (2.19)$$

sendo:

x = constante de regulação secundária de velocidade (ajuste de bias);

$\alpha = 1/R$ (estatismo);

P_g = sinal de valor de potência na saída do governador;

P_m = potência mecânica de saída da turbina e entrada no gerador (fornecida à máquina síncrona);

T_g = constante de tempo do governador;

T_m = constante de tempo da turbina; e

y_1 = erro de controle de área [1,3].

2.2 Sistema de Potência multimáquinas.

2.2.1 Sistema de Potência multimáquinas com estrutura da rede preservada

Considere um sistema de potência com n máquinas conectadas por uma rede com m barras como ilustrado na figura 2.4.

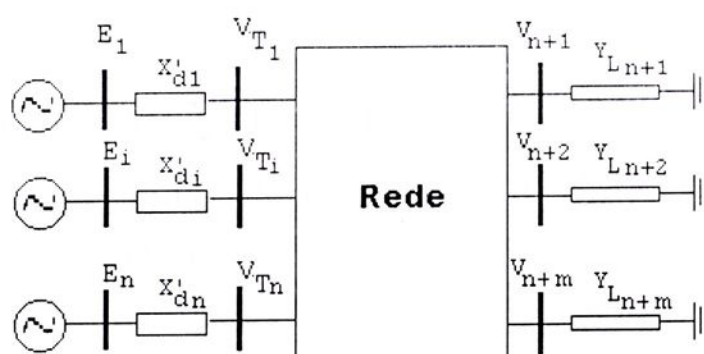


fig. 2.4 – Sistema de Potência multimáquinas.

As máquinas são consideradas como fontes de tensão constante atrás da reatância transitória do eixo direto (X'_{di}) e o desempenho dinâmico é descrito por:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_i, \\ \dot{\omega}_i &= \frac{1}{M_i} (P_{Mi} - P_{ei} - D_i \omega_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.20)$$

O sistema é representado através de um modelo de estrutura preservada que inclui as barras internas das máquinas [3]. As seguintes matrizes são usadas. A matriz K [4] incidência de elemento-nó para a rede aumentada e a correspondente matriz susceptância primitiva são usadas para descrever a

rede. A matriz de admitância de barra é dada por $Y = K^T [b]K$. A rede é considerada sem perdas $Y = jB$ (aqui, $j = \sqrt{-1}$).

Genericamente, a tensão da i -ésima barra na rede aumentada tem magnitude V_i e ângulo θ_i incluído nas primeiras n barras que são a tensão interna dos geradores com magnitude E_i e ângulo δ_i .

As injeções de potência ativa e reativa nas i -ésimas barras são dadas por:

$$P_{ei} = P_{Gi} - P_{Li} = G_{ii} V_i^2 + \sum_{j=1}^{n+m} V B_{ij} V_j \sin(\theta_{ij}) \quad (2.21)$$

$$Q_{ei} = Q_{Gi} - Q_{Li} = -B_{ii} V_i^2 - \sum_{j=1}^{n+m} V_i B_{ij} V_j \cos(\theta_{ij}) \quad (2.22)$$

onde θ_{ij} é deslocamento angular definido por $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$. Sendo:

P_{Gi} = a potência gerada na barra;

P_{Li} = a potência consumida na barra.

O desvio da potência ativa e reativa na linha $i - j$ com respeito ao equilíbrio é dado por:

$$\Delta P_{e_{ij}} = f(\sigma, V) \quad (2.23)$$

$$\Delta Q_{e_{ij}} = V_i g(\sigma, V) \quad (2.24)$$

onde:

$$f(\sigma, V) = B_{ij}^0 [V_i V_j \sin(\sigma + \theta_{ij}^0) - V_i^0 V_j^0 \sin \theta_{ij}^0] \quad (2.25)$$

$$g(\sigma, V) = B_{ij} [-V_j \cos(\sigma + \delta_{ij}^0) + V_j^0 \cos(\delta_{ij}^0)] \quad (2.26)$$

$$k=1,2,3,\dots, m_e$$

$$\sigma = K[\theta - \theta^0] \quad (2.27)$$

o desvio da injeção de potência na i -ésima barra é dado por:

$$\Delta P_{ei} = K_i^T f(\sigma) \quad (2.28)$$

onde K_i é a i -ésima coluna de K . Da equação 2.22 temos:

$$\Delta \left(\frac{Q_{ei}}{V_i} \right) = -B_{ii} \Delta V_i + \sum_{j \in \Omega_i} g(\sigma_k, V_j) \quad (2.29)$$

Por outro lado, se as cargas são admitâncias constantes do tipo

$$Y_{Li} = G_{Li} + jB_{Li} \text{ então:}$$

$$\frac{Q_{Li}}{V_i} = B_{Li} V_i \quad (2.30)$$

Supor agora a variação da injeção de potência reativa: para uma variação da potência reativa ΔQ_{Li} , mostrada na figura 2.5.

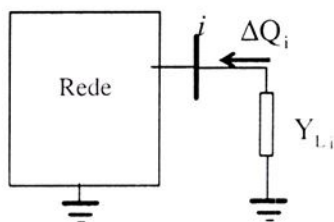


Fig.2.5 - Variação da injeção de Potência reativa na i-ésima barra

Em outras palavras:

$$\Delta \left(\frac{Q_{Li}}{V_i} \right) = B_{Li} \Delta V_i \quad (2.31)$$

Assumindo que a tensão tem uma dinâmica governada por uma 'constante de tempo' ξ'_i :

$$\xi'_i \frac{d(\Delta V_i)}{dt} = \Delta V_i^f \quad (2.32)$$

Já que $Q_{Li} = -Q_i$ devido à (2.31), (2.32) pode ser reescrita como:

$$\xi'_i \frac{d(\Delta V_i)}{dt} = +B_{ii} \Delta V_i - \sum_{j \in \Omega_i} g(\sigma_k, V_j) \quad (2.33)$$

onde: $\xi_i = B_{Li} \xi'_i$.

Agora sejam as matrizes definidas:

$$M = \begin{bmatrix} \text{diag}[M_i] & 0 \\ 0 & \text{diag}[\mu_k] \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m \quad (2.34)$$

onde μ_k é um “coeficiente de inércia” associado à k-ésima carga;

$$Z = \text{diag}[\xi_k]; k = 1, 2, \dots, m \quad (2.35)$$

como ξ_k a “constante de tempo” associada a k-ésima tensão;

$$B_d = \text{diag}[B_{kk}] \quad (2.36)$$

Onde $k \in \{\text{barras de carga}\}$. Faz com que seja definido como

$$v = [\Delta V_1 \quad \Delta V_2 \quad \dots \quad \Delta V_m]^T \quad e \quad (2.37)$$

$$G(V, \sigma) = [G_1(V, \sigma) \quad G_2(V, \sigma) \quad \dots \quad G_m(V, \sigma)]^T$$

com

$$G_i(V, \sigma) = \sum_{k=1}^m g_k(V_j, \sigma_k) \quad (2.38)$$

O modelo do sistema de potência com estrutura preservada é agora escrito de como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1}D & -M^{-1}K^T & 0 \\ K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z^{-1}B_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ f(\sigma, V) \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -Z^{-1}G(V, \sigma) \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

[4,5].

3 Os dispositivos FACTS

O conceito de sistemas com fluxos de potência controláveis, ou “Flexible AC Transmission Systems” (FACTS), tem recebido muita atenção recentemente, resultando na concepção de vários novos dispositivos para o controle dos fluxos nas redes de energia elétrica. Estes dispositivos são pesquisados com dois objetivos principais:

- Aumentar a capacidade de transmissão de potência das redes;
- Controlar diretamente o fluxo de potência em rotas específicas de transmissão.

O fluxo de potência numa rede de transmissão está limitado por uma combinação dos seguintes fatores:

- Estabilidade;
- Fluxos paralelos ou fluxo de malha;
- Limites de tensão;
- Limites térmicos de linhas ou equipamentos.

Dispositivos FACTS (principalmente os dispositivos série) são aplicáveis, de forma mais direta, às restrições de transmissão de potência relacionadas com problemas de estabilidade. Com este objetivo, têm sido testados, por exemplo, compensadores em derivação (SVC) e amortecedores de ressonâncias sub-síncronas.

A estabilidade dos sistemas de potência passou a ter maior grau de liberdade com a utilização dos equipamentos FACTS. Nos estudos de estabilidade transitória, ou seja, frente a grandes perturbações, estes equipamentos podem propiciar o aumento do limite de transferência de



grandes blocos de energia como, por exemplo, com o chaveamento de grandes capacitâncias série em determinadas linhas de transmissão.

Os equipamentos FACTS também são de grande valia nos estudos de estabilidade dinâmica (frente a pequenas perturbações). Neste caso, por exemplo, o amortecimento das oscilações do sistema pode ser aumentado através do chaveamento de pequenas capacitâncias em série com as linhas de transmissão.

O uso deste dispositivo FACTS deve ser cuidadosamente estudado do ponto de vista de controle. Para isso, os conceitos de controle robusto e coordenado devem ser levados em consideração.

3.1 Compensador série controlado a Tiristor (“TCSC – Thyristor Controlled Series Compensator”)

O principal intuito da compensação série é diminuir a reatância efetiva total da linha de transmissão por meio da conexão série de capacitores. Em uma visão simples, a reatância do capacitor conectado em série com a linha de transmissão cancela uma porção da reatância da linha e, portanto, a reatância efetiva da linha de transmissão é reduzida, como se a linha de transmissão tivesse sido encurtada. Esta redução da reatância efetiva da linha aumenta a capacidade de transmissão de potência do sistema e reduz o ângulo de transmissão para um determinado nível de transferência de potência. Por outro lado, a redução da reatância da linha de transmissão faz com que a absorção de potência reativa seja menor, fazendo-se necessário em alguns casos o uso de compensação indutiva em derivação (shunt). Além de reduzir a reatância da linha, a compensação série também pode ser usada para:



- Aumentar a transferência de potência em linhas de qualquer comprimento. Algumas vezes a compensação série é usada para aumentar a carga em uma de duas ou mais linhas de transmissão paralelas, especialmente quando há linhas de alta tensão juntamente com linhas de baixa tensão no mesmo sistema.
- Permitir a transmissão estável de potência em distâncias maiores do que é possível com sistemas sem compensação.

De acordo com um limite prático para o grau de compensação série é da ordem de 80%. Uma compensação de 100% faz com que a reatância efetiva da linha de transmissão seja nula e, dessa forma, pequenas perturbações no eixo da máquina farão que haja um fluxo de corrente de grande amplitude. Além disso, o circuito poderá tornar-se ressonante na frequência fundamental, o que dificultará o controle de transitórios de tensão e corrente durante distúrbios.

A reatância do capacitor é determinada pelas características desejadas para a transferência de potência em regime permanente e regime transitório, bem como pela localização do capacitor na linha de transmissão. A localização do capacitor, por sua vez, é determinada por fatores econômicos e pela severidade das correntes de curto-circuito (as quais dependem da localização do capacitor).

A figura 3.1 mostra o diagrama unifilar do Compensador Série Controlado a Tiristor (TCSC).

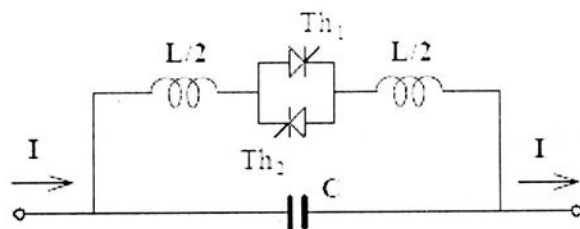


Fig. 3.1 – Diagrama unifilar do TCSC.

O valor da reatância capacitiva inserida no sistema pelo TCSC é determinado pelo controle das reatâncias indutivas através do adequado chaveamento do banco de tiristores [5].

3.1.1 Análise dos dispositivos FACTS instalados no sistema de potência

3.1.1.1 Modelo do sistema e características de transmissão

O modelo mais simples de uma unidade geradora serve como base para considerações relativas ao impacto dos dispositivos FACTS nas características da linha. O esquema elétrico é representado na figura 3.1a.

Tal modelo pode ser uma representação dos dois casos idealizados, isto é:

- Gerador é equipado com um regulador de tensão ideal, o qual mantém sob controle a tensão constante da barra do gerador. Neste caso X representa a soma de x_t e x_L ; $U_1(\underline{U}_1=U_1 e^{j\delta})$ representa a tensão da barra geradora (x_t é a reatância do transformador e x_L é a reatância da linha).
- O regulador de tensão do gerador é muito lento e não reage durante a primeira oscilação. Neste caso $\underline{U}_1$ representa a E' transitória do gerador, quando X é a somatória de x'_d , x_t e x_L .

Como é bem conhecida para o sistema presente, a energia ativa transmitida é expressa em função do ângulo δ como segue:

$$P_1 = P_2 = P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin(\delta) \quad (3.1)$$

A equação (3.1) é a relação das características básicas do fluxo de potência. Como no exemplo teste apresentado não há perdas no sistema, a potência ativa transmitida não muda ao longo da linha. As características de transmissão são



representadas em p.u., sendo base de potência o valor P_{max} , como representado na figura 3.1(a e b) [2].

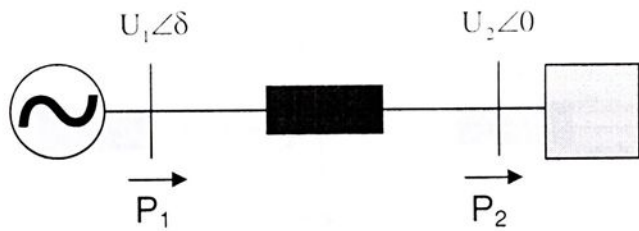


fig 3.1(a) – Esquema da rede

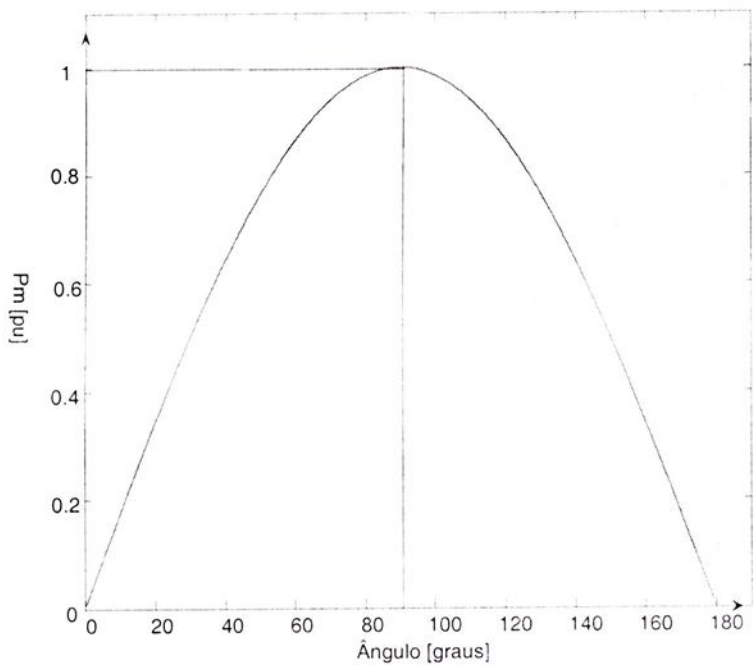


fig 3.1 (b) Características básicas do sistema

3.1.1.2 Controle de transmissão de energia usando a compensação serie controlada (CSC – Controllable series compensation)

Do ponto de vista do sistema o CSC pode ser representado como uma capacitância controlada conectada em série na linha. O modelo da rede com o CSC incluído é representado na figura 3.2(a). A variável do controlador CSC pode ser representado por uma reatância x_{csc} . Se CSC estiver operando no



modo capacitivo é x_{csc} negativo, enquanto estiver operando no modo indutivo ele é positivo. As características de transmissão são determinadas com:

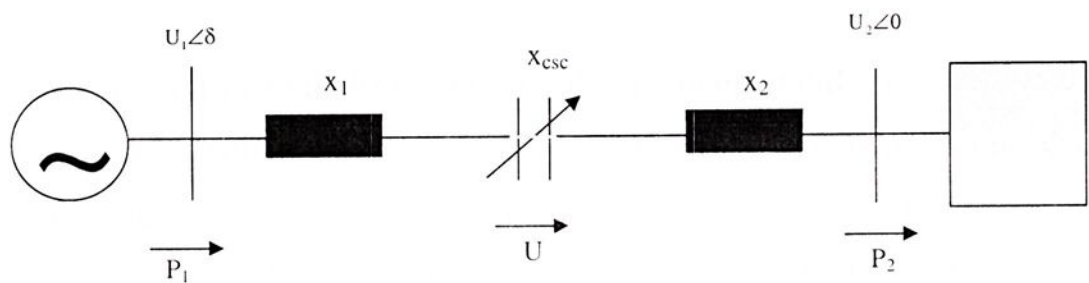


Fig 3.2 (a) - Esquema da Rede

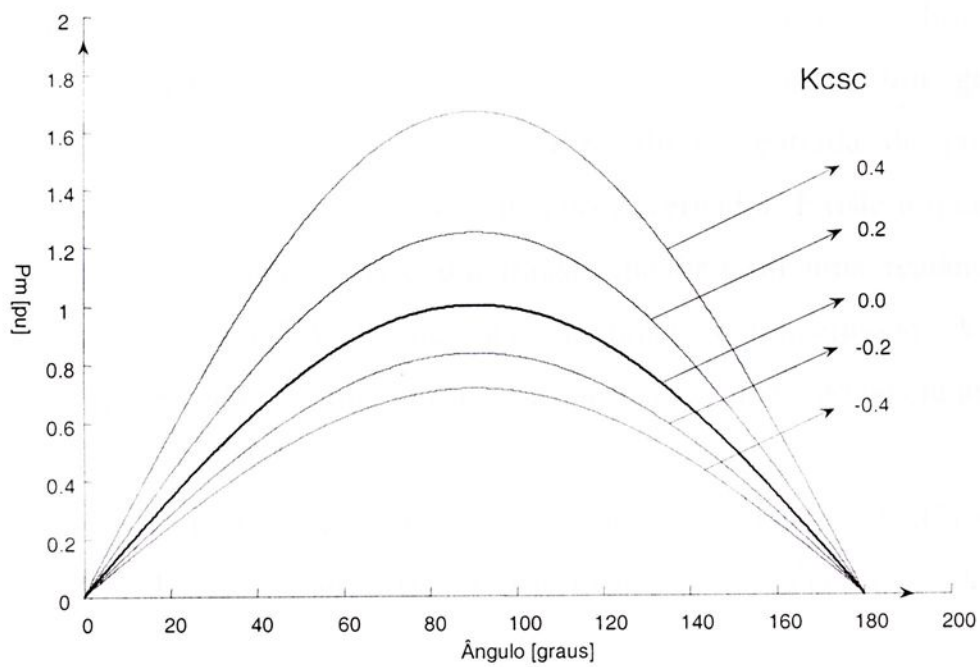


fig.3.2 (b) Características de Transmissão

$$P_1 = P_2 = P = \frac{U_1 \cdot U_2}{x_{lt} + x_{csc}} \text{sen}(\delta) = \frac{U_1 \cdot U_2}{x_{lt} \cdot (1 - K_{csc})} \text{sen}(\delta) \tag{3.2}$$

K_{csc} é o grau de compensação serie ($K_{csc}=x_{csc}/x_{lt}$). A localização de um CSC não afeta as características de transmissão do sistema. A relação entre x_1 e x_2 (figura 3.2) é arbitrária e a soma deles é igual à x_{lt} . As características de

transmissão para vários graus de compensação de K_{csc} está representado na figura 3.2(b) [2].

3.2 Compensação da linha para melhoria da estabilidade.

Para investigar a compensação pelos controladores FACTS em regime permanente do sistema de potência, o modelo do sistema de energia considerado é o MBI. Algumas suposições simplificadoras são feitas para claramente ilustrar o desempenho relativo dos controladores FACTS. Em particular os efeitos de capacitância paralela e resistência na linha são ignorados. O sistema analisado (veja figura 3.3) contém um gerador equivalente com uma reatância x_d no eixo direto, entrada de potência mecânica constante P_m omitindo os efeitos do governador. Existe um circuito simples com uma reatância x , e um transformador com uma reatância x_l . Existe um controlador FACTS no meio da linha de transmissão. A barra infinita é representada por uma tensão constante V_g e uma frequência angular ω_n .

Visando estimar os efeitos adicionais dos controladores FACTS para melhorar a estabilidade transitória, o critério das áreas iguais é usado para avaliar o efeito dos métodos de compensação em estabilidade transitória após uma falta do tipo curto-circuito no sistema de transmissão de energia. Apesar da aproximação simplista, isto nos permitirá fazer uma avaliação qualitativa da melhoria de estabilidade por controladores FACTS. Para propósitos de comparação, assumiu-se que o fluxo de potência pré-falta e a duração da falta são os mesmos em ambos os casos. Além disso, considera-se uma falta que acontece na linha de transmissão perto do gerador. Considerando a linha não compensada, no regime pré-falta o gerador assume um ângulo δ tal que $P_e(t) = (E_q(t)V_s/x_{qs})\sin\delta$ é igual a entrada de potência mecânica P_m .



Sendo que x_{qs} é a soma da reatância da linha, mais a reatância do transformador e mais reatância do eixo direto.

A razão $E_q(t)V_s/x_{qs}$ representa a máxima potência que se pode transferir na linha sem compensação e é denotada por $P_{m\acute{a}x}$. Quando a falta ocorre, a potência elétrica transmitida é anulada e a potência mecânica de entrada do gerador causará uma aceleração no rotor, e assim aumentando a energia cinética no rotor, de modo que o ângulo δ do gerador atinge um valor máximo depois da falta removida, no caso de o sistema não perder o sincronismo. Considerando a presença de um controlador FACTS, este proporciona um reforço da capacidade de transmissão de modo que a energia cinética da máquina pode ser absorvida com uma variação menor do ângulo como resultado do aumento de $P_e(t)$. Com a compensação da linha, $P_e(t)$ tem um substancial acréscimo na capacidade máxima na curva potência-ângulo ($P-\delta$) [2,7].

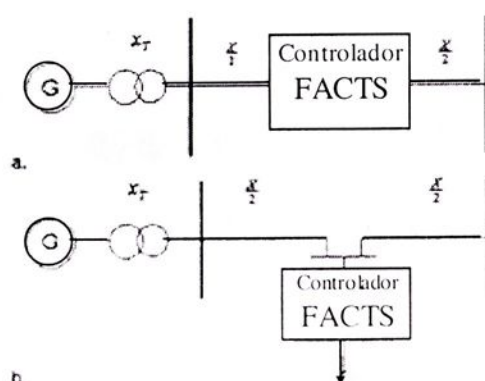


Figura 3.3 - Modelo do sistema com controlador FACTS conectado em (a) série, (b) paralelo.

4. Formas de Compensação série da linha

Existem várias formas de compensação série de uma linha sendo uma delas a fixa, constituindo-se em um banco de capacitores de valor de capacitância (reatância capacitiva) constante.

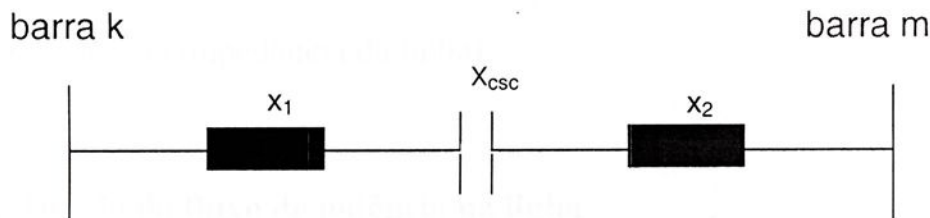


Figura 4.1 – Duas barras ligadas por uma linha.

A compensação variável depende da lei de controle empregada. Na forma mais simples, pode ser uma realimentação pura ou proporcional. De outra forma pode-se utilizar um controlador PI ou compensação de fase empregando blocos lead-lag. Nestes casos há acréscimo na dimensão do espaço de estado do sistema pela adição de variáveis de estado do próprio controlador.

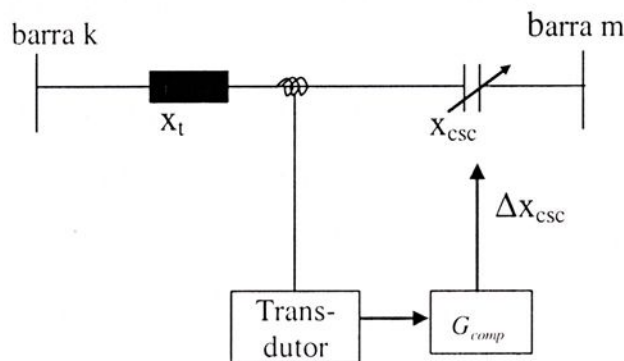


Figura 4.2 – Duas barras ligadas por uma linha.

4.1 Sinais de Entrada

Existem várias variáveis do sistema que podem ser localmente mensuráveis, as quais são: valor absoluto do desvio de fluxo de potência na linha, desvio de corrente e desvio de queda de tensão na linha (Na verdade, a variável que é medida é a corrente e a queda de tensão é obtida a partir do conhecimento da impedância da linha).

4.1.1. Desvio do fluxo de potência na linha

Sendo: $I_{km} = \frac{E_k - E_m}{Z_{lt}}$, $S_{km} = E_k \times I_{km}^*$ e $S_{km} = P_{km} + j \times Q_{km}$ então fica P_{km} dado

pela parte real da potência complexa, e o desvio do fluxo de potência na linha é dado por: $\Delta P_{km} = P_{km} - P_{km0}$ [14, 15, 16, 17].

P_{km} é fluxo de potência ativo na linha;

P_{km0} é seu valor de equilíbrio.

4.1.2 Desvio da magnitude da corrente na linha

Da mesma maneira que se usa a desvio de fluxo de potência como sinal de entrada para o compensador serie controlado, em outra abordagem [14] usa-se a variação do valor absoluto da corrente como sinal de entrada, desta

forma, a partir de $I_{km} = \frac{(E_k - E_m)}{Z_{lt}}$ obtém-se $\Delta I_{km} = |I_{km}| - |I_{km0}|$ e ΔI_{km} é o sinal

de entrada para o controlador.

I_{km} é a corrente entre as barras km;

I_{km0} é o seu valor nas condições normais de operação.



4.1.3. Desvio da magnitude da queda de tensão na linha

Neste caso [5], a entrada u é dada por: $\Delta V_{km} = |V_{km}| - |V_{km0}|$, V_{km} é dado por: $V_{km} = V_k - V_m$
 V_{km} é queda de tensão na linha entre as barras;
 V_{km0} é o seu valor nas condições normais de operação.

4.2.1. Compensação Proporcional ou Pura

A primeira função proposta para o controle do estabilizador é mostrada na figura 4.3.

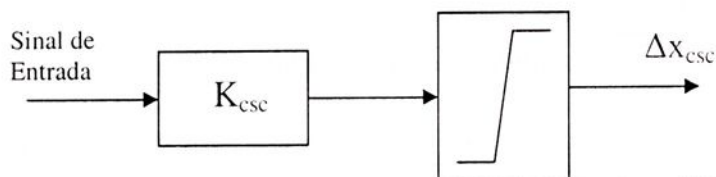


Figura 4.3 – Função transferência proposta para a melhoria da estabilidade.

O sinal de entrada u pode ser a variação do fluxo de potência ou variação do valor absoluto da corrente ou ainda da queda de tensão e então se tem

$$\Delta x_{csc} = K_{csc} \cdot u \quad (4.01)$$

4.2.2 Compensador com compensação de fase (lead-lag)

A função de transferência chamada lead-lag tem como objetivo proporcionar compensação de fase no sistema de acordo com a necessidade de avanço ou atraso com vistas ao introduzir no sistema um sinal que exerça

efeito positivo no amortecimento de oscilações. A função de transferência do estabilizador é mostrada na figura 4.4, e para obter-se adequada compensação de fase, deve-se ajustar seus parâmetros de ganho e constantes de tempo, de modo conveniente em face da necessidade do sistema. A função transferência é introduzida no sistema de modo que sua saída é a variável que descreve as variações da reatância do CSC e são adicionadas ao vetor de estado do sistema e as variáveis que descrevem o desempenho dinâmico do compensador (lead-lag) [14,17].

Na prática, utilizam-se blocos de avanço-atraso de fase que compensam os atrasos ou avanços de fase dos sinais de entrada.

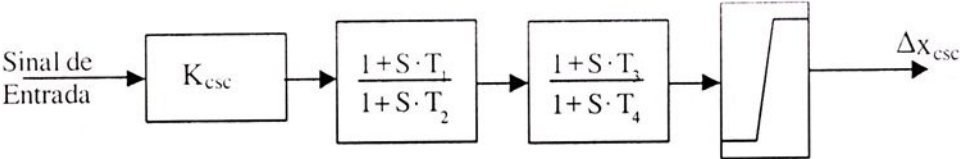


Figura 4.4 – função transferência do estabilizador com lead-lag

Como exemplo do porque do atraso de fase pode-se usar duas máquinas síncronas (ou um equivalente de duas máquinas para um sistema) ligadas por uma linha de transmissão. Como na figura:

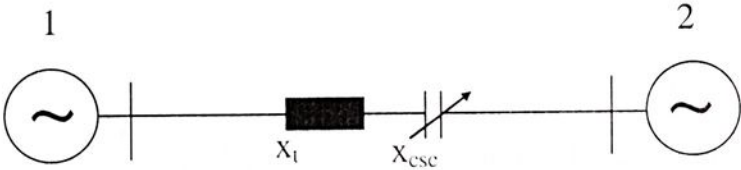


Figura 4.5 – modelo equivalente com duas máquinas ligadas por uma linha de transmissão

Sabe-se que:

$$\dot{\delta}_{12} = \omega_{12} \tag{4.02}$$

$$\dot{\omega}_{12} = \frac{1}{M_1} [P_{m1} - P_{e1} - D_1 \cdot \omega_1] - \frac{1}{M_2} [P_{m2} - P_{e2} - D_2 \cdot \omega_2] \quad (4.03)$$

$$\dot{\omega}_{12} = \frac{1}{M_1 \cdot M_2} [(M_2 \cdot P_{m1} - M_1 \cdot P_{m2}) - (M_2 \cdot P_{e1} - M_1 \cdot P_{e2}) - (M_2 \cdot D_1 \cdot \omega_1) + (M_1 \cdot D_2 \cdot \omega_2)] \quad (4.04)$$

$$P_{e1} = \frac{E_1 \cdot E_2}{X} \cdot \text{sen} \delta_{12}; P_{e2} = \frac{E_2 \cdot E_1}{X} \cdot \text{sen} \delta_{21}; P_{e1} = -P_{e2} \quad (4.05)$$

Admitindo:

$$\frac{D_1}{M_1} = \frac{D_2}{M_2} = \lambda \quad (4.06)$$

tem-se:

$$\dot{\delta}_{12} = \omega_{12} \quad (4.07)$$

$$\dot{\omega}_{12} = \frac{1}{M_1 \cdot M_2} [(M_2 \cdot P_{m1} - M_1 \cdot P_{m2}) - (M_2 \cdot P_{e1} - M_1 \cdot P_{e2}) - \lambda \cdot \omega_{12}] \quad (4.08)$$

E podendo-se escrever

$$P_{e1} = \frac{E_1 \cdot E_2}{x'_d + x_e - x_c} \cdot \text{sen} \delta_{12} \cong \frac{E_2 \cdot E_1}{x'_d + x_e - x_c^0} \cdot \text{sen} \delta_{12} + K_{xp} \Delta x_c \quad (4.09)$$

com

$$K_{xp} = \left. \frac{\partial P_e}{\partial X_c} \right|_0 = \frac{E_1 \cdot E_2}{(x'_d + x_e - x_c^0)^2} \cdot \text{sen} \delta_{12} \quad (4.10)$$

tem-se que:

$$\Delta \dot{\omega}_{12} \propto -\Delta P_{e1} \quad (4.11)$$

e, apenas para análise, considera se esta equação no domínio da frequência:

$$s \Delta \omega_{12}(s) = -\kappa \Delta P_{e1}(s) \quad (4.12)$$

ou

$$j\omega \Delta \omega_{12}(s) = -\kappa \Delta P_{e1}(j\omega) \quad (4.13)$$

ou ainda

$$\Delta\omega_{12}(s) = j\frac{K}{\omega}[\Delta P_e(j\omega)] \quad (4.14)$$

A última expressão mostra que a dinâmica própria do sistema determina que a variação da velocidade angular relativa entre os extremos de uma linha esteja adiantada (neste caso ideal, de 90°) em relação à variação da potência ativa que flui na linha. Considere-se então o diagrama a seguir.

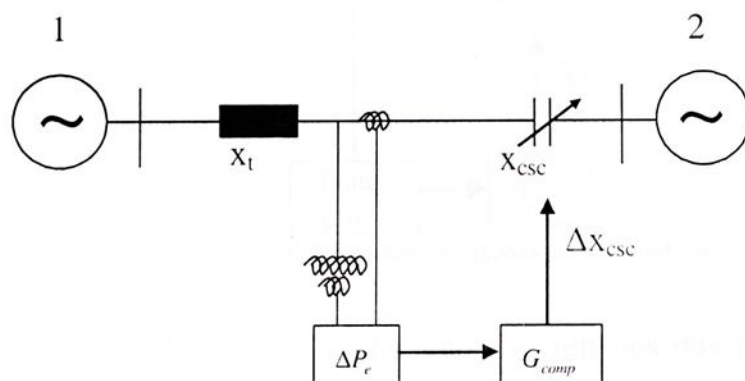


Figura 4.6 - modelo equivalente com duas máquinas ligadas por uma linha de transmissão.

Note-se que a parcela da potência ativa dependente da reatância do TCSC é

$$\Delta P_e(X_{csc}) = K_{xp} \Delta X_{csc} \quad (4.15)$$

ou seja, proporcional – o que significa em fase – com ΔX_{csc} . Então, para se obter via TCSC um sinal $\Delta P_e(X_{csc})$ a partir da variação da potência ativa que flui na linha em fase com a velocidade angular relativa entre os terminais da linha a função de transferência G_{comp} deve ser definida como um avanço de fase. Mas, na verdade o objetivo é se obter uma ação contrária às variações da velocidade angular relativa entre os terminais da linha, de modo então que G_{comp} dever ser um atraso de fase fazendo com que a ação dinâmica do TCSC seja no sentido de se contrapor à variação da velocidade angular.

Considere-se a utilização de um sinal proporcional à corrente que flui na linha como variável de entrada do compensador, como indicado no diagrama esquemático da figura 4.7.

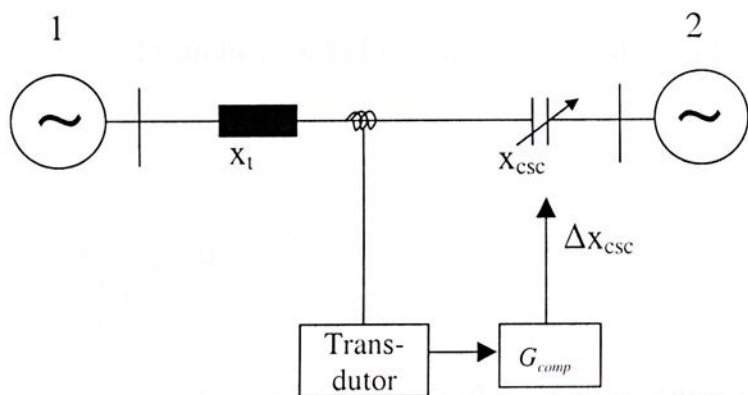


Figura 4.7 - modelo equivalente com duas máquinas ligadas por uma linha de transmissão.

Note-se que a defasagem angular entre as tensões das máquinas pode ser avaliada a partir de

$$E_1 \angle \delta_1 - E_2 \angle \delta_2 = j(X_t - X_{csc}) \cdot I \tag{4.16}$$

ou, como indicado no diagrama fasorial, construído supondo por simplicidade as tensões E_1 e E_2 de mesma magnitude: $E_1 = E_2 = E$.

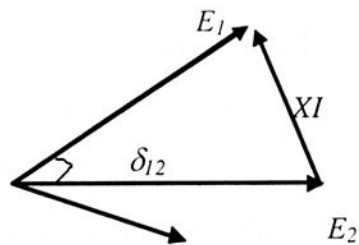


Figura 4.8 – Diagrama fasorial

Nesta situação,

$$\delta_{12} = 2 \arctan\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{X}{E} \cdot I\right) \tag{4.17}$$

e se pode obter a expressão para pequenas variações

$$\Delta\delta_{12} = \frac{\frac{X}{E}}{1 + \left(\frac{1}{2} \frac{X}{E} I\right)^2} \Delta I \quad (4.18)$$

de onde, multiplicando ambos os lados por $j\omega$, e notando que $j\omega\Delta\delta_{12} = \Delta\omega_{12}(j\omega)$ obtém-se:

$$\Delta\omega_{12}(j\omega) = j\omega \frac{\frac{X}{E}}{1 + \left(\frac{1}{2} \frac{X}{E} I\right)^2} \Delta I \quad (4.19)$$

Nota-se que a variação da velocidade angular relativa entre os terminais da linha encontra-se em avanço de fase (neste caso ideal, de 90°) sobre a variação da corrente, ou a variação da corrente encontra-se atrasada em relação à velocidade. Lembrando que $\Delta P_{el}(\Delta x_c) = K_{sp} \Delta x_c$ e sendo $\Delta x_c(s) = G_{comp}(s) \Delta I(s)$, para se obter $\Delta x_c(s)$ e consequentemente $\Delta P_{el}(\Delta x_c)$ em fase com a velocidade relativa entre os terminais da linha deve-se definir G_{comp} como um avanço de fase.

4.2.3 Controlador PI

Agora aplicaremos um controle PI, caracterizado por um ganho proporcional e integral ao sistema, e para obter uma resposta adequada, deve-se ajustar seus parâmetros de ganho proporcional e integral, respectivamente K_p e K_i . A função transferência do estabilizador é mostrada na figura 4.9. A função transferência é adicionada ao sistema dinâmico, introduzindo uma variável de estado (a saída do integrador) e Δx_{csc} é a saída deste controlador [15, 16].



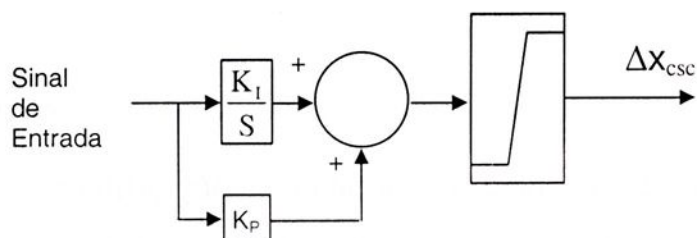


Figura 4.9 – função do estabilizador como PI.

5. Simulações

Visando exemplificação e validação dos resultados dos estudos teóricos apresentados nos capítulos anteriores, toma-se como sistema teste um sistema de 06 máquinas e 12 barras, extraído da referência [8] e descrito pelo diagrama unifilar da figura 5.1 e dados tabulados adiante.

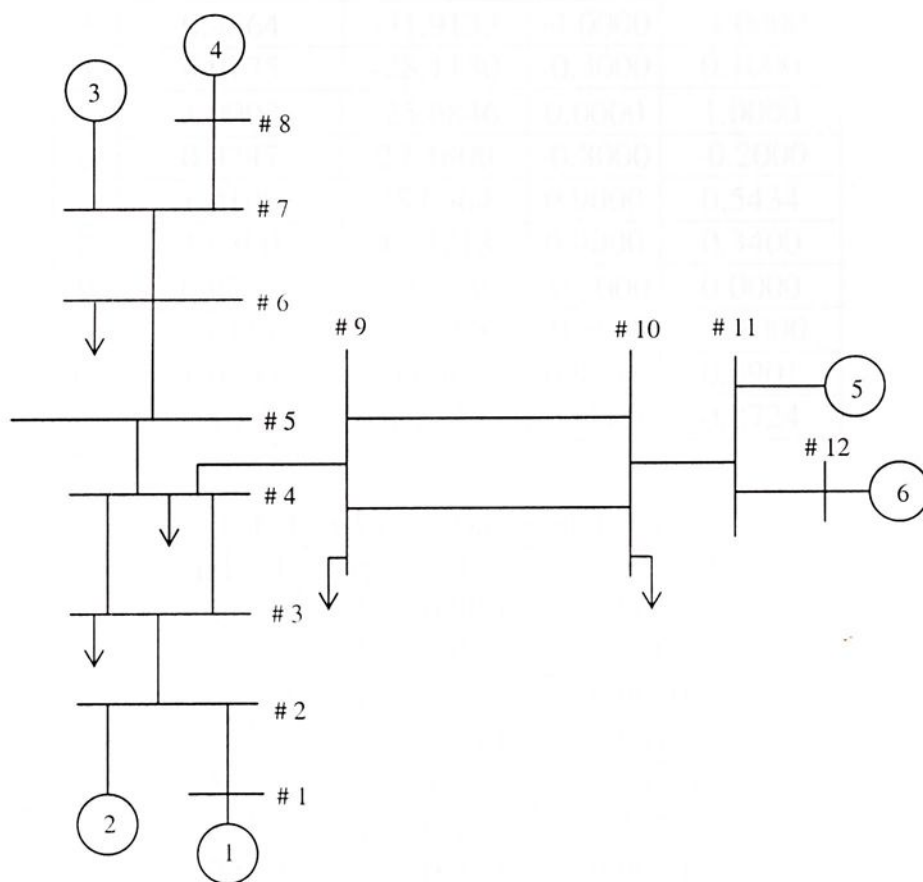


Figura 5.1 – sistema de três áreas com 6 máquinas e 12 barras.

Nas tabelas 5.1.(a) e 5.1.(b), tem-se os dados de barra e de linha respectivamente. Para executar este caso foram inseridos os seguintes dados no programa: na barra #7 onde ocorre o curto-circuito (sem desligamento da linha), o tempo de simulação igual a 20s, tempo de eliminação da falta de

0.05s, e passo de integração igual 0.005. Com estas características tem-se um gráfico dos ângulos internos de cada máquina do sistema em relação ao tempo de acordo com a figura 5.2.

Tabela 5.1.(a) - Dados de Barra.

Nb	Tensão		Potência [pu]	
	Modulo [pu]	Ang(graus)	Ativa	Reativa
1	1.0700	-16.9590	1.4000	0.4791
2	1.0200	-24.0755	1.4000	0.9142
3	0.9564	-31.9133	-4.0000	-1.0000
4	0.9775	-28.1130	-0.3000	0.1000
5	1.0002	-25.6846	0.0000	1.0000
6	0.9247	27.4800	-0.8000	-0.2000
7	1.0100	38.0364	0.9000	0.5434
8	1.0300	40.4218	0.9000	0.3400
9	0.9758	-23.7789	-0.5000	0.0000
10	1.0114	-9.4108	-0.5500	-0.1000
11	1.0700	0.0000	0.9358	0.3901
12	1.1000	4.2525	0.9000	0.2724

Tabela 5.1.(b) - Dados de Linha

LT	K	M	G	B
1	1	2	0.9901	-9.9010
2	2	3	1.9802	-19.8020
3	3	4	0.9901	-9.9010
4	3	4	0.9901	-9.9010
5	4	5	1.9802	-19.8020
6	5	6	0.1238	-1.2376
7	6	7	0.9901	-9.9010
8	7	8	1.9802	-19.8020
9	4	9	0.9901	-9.9010
10	9	10	0.2475	-2.4752
11	9	10	0.2475	-2.4752
12	10	11	0.9901	-9.9010
13	11	12	0.9901	-9.9010



Tabela 5.1. (c)

Dados da Máquina [pu] (todas iguais)	
X_d	1.880
x'_d	0.330
M	0.019
D	0.010
T'_{d0}	0.400
T'_{q0}	0.400
K_R	25.00
T_R	0.080
E_{fdmax}	05.00
E_{fdmin}	-05.00
T_g	01.00
T_m	01.00

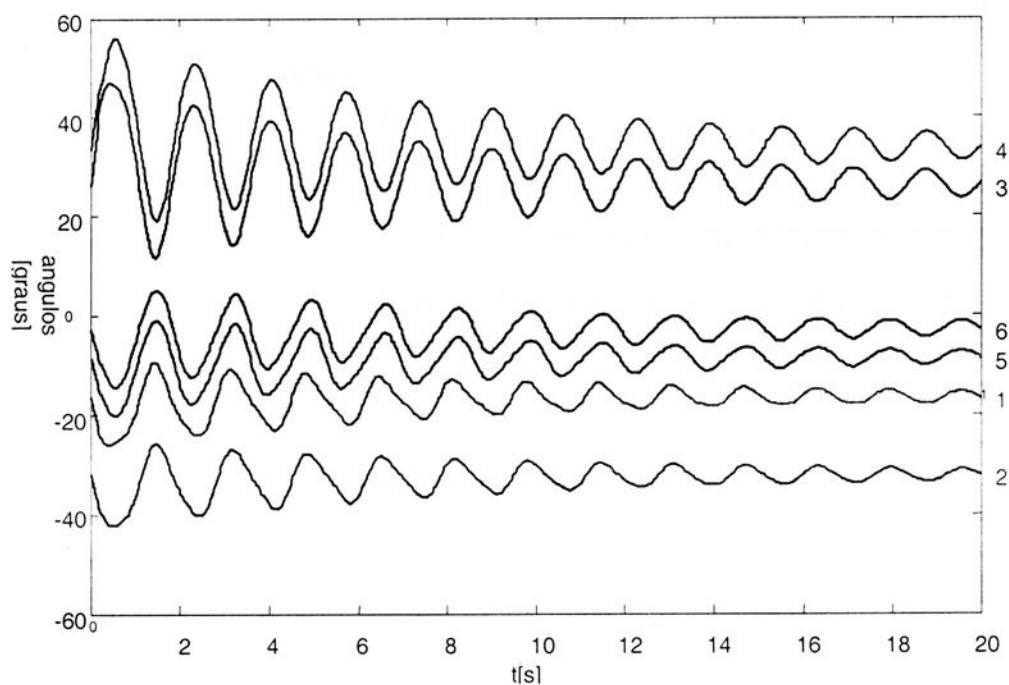


Figura 5.2 – Comportamentos dos ângulos internos das máquinas (primeiro caso)

No gráfico da figura 5.2 pode-se verificar que o sistema tende à estabilidade, embora com um amortecimento muito fraco.

Nas figuras 5.3, 5.4 e 5.5, mostram-se a variação do fluxo de potência, valor absoluto da corrente e da queda de tensão respectivamente na linha (5 – 6) onde haverá a compensação série (TCSC), tanto fixa, como controlada. Estas variáveis serão usadas posteriormente como sinal de entrada para o compensador controlado.

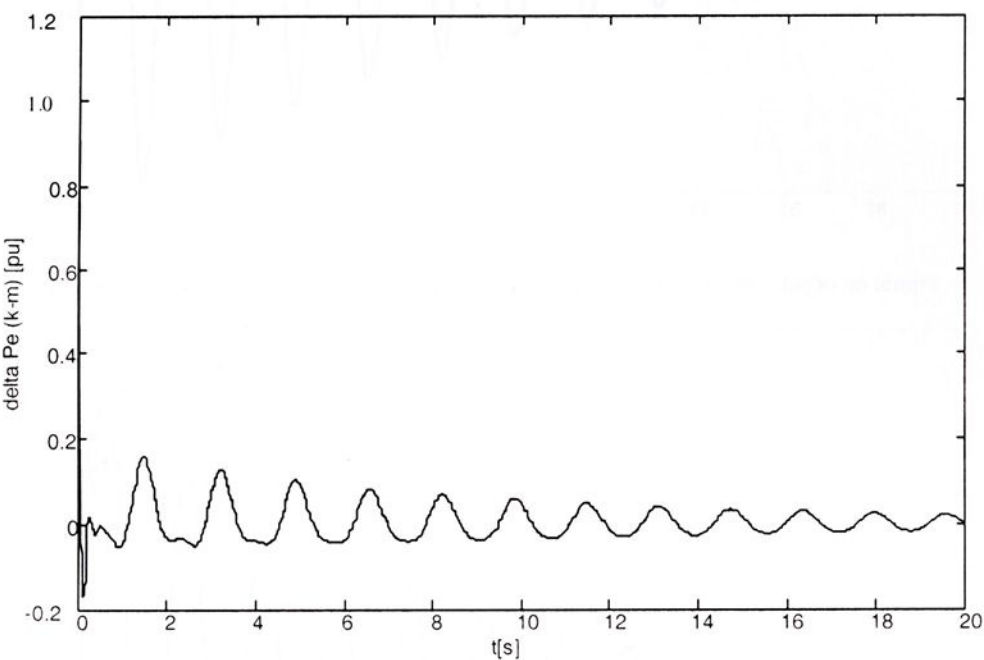


Figura 5.3 – O comportamento do fluxo de Potência da linha (6 – 5) em relação ao tempo.



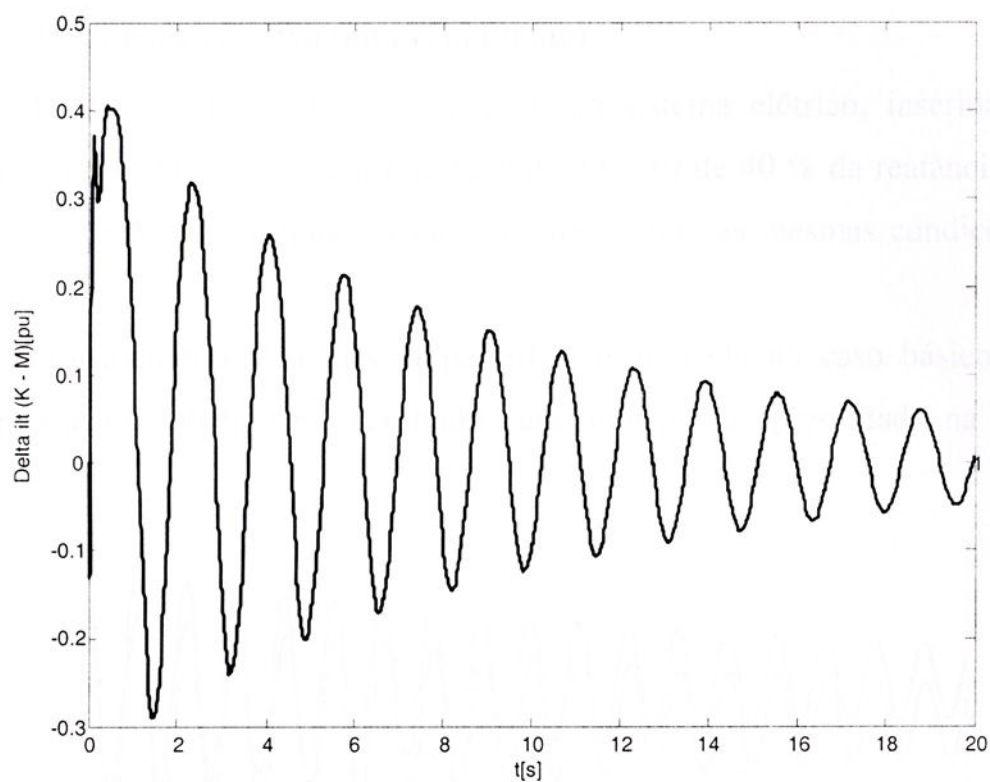


Figura 5.4 – O comportamento do fluxo de corrente da linha 5-6 em relação ao tempo

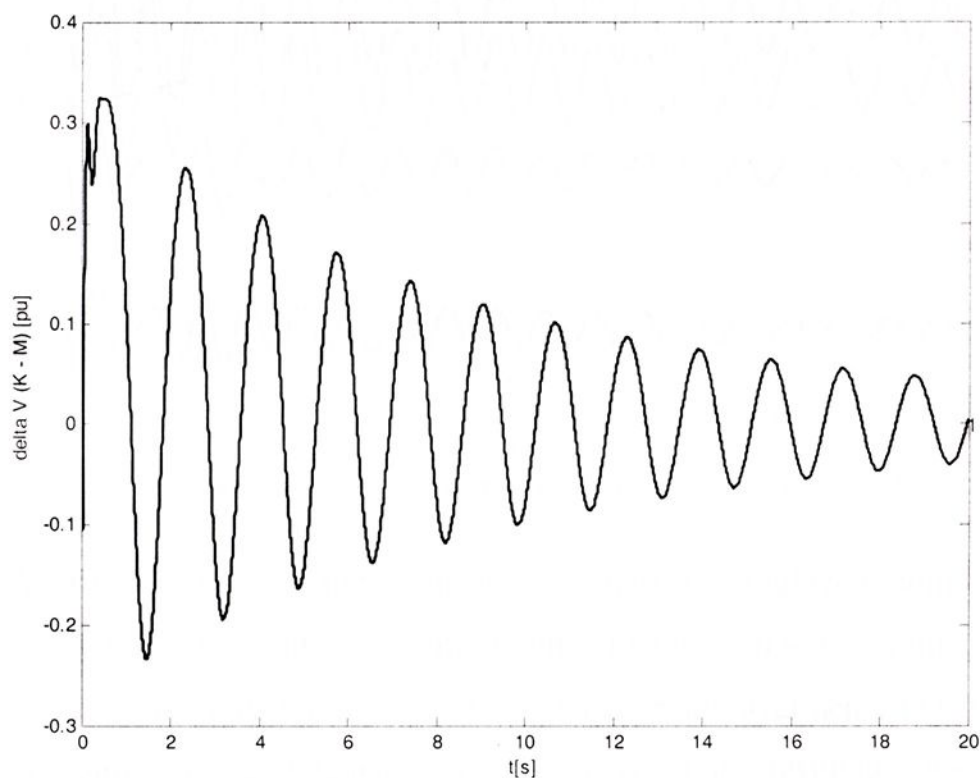


Figura 5.5 – O comportamento da queda de tensão da linha 5-6 em relação ao tempo

5.1. Compensação fixa (ou permanente)

Tem-se então neste segundo caso no sistema elétrico, inserida uma compensação serie capacitiva fixa na linha (5 – 6) de 40 % da reatância total da linha. Neste caso e também todos outros se tem as mesmas condições de perturbação.

Considerando-se a mesma perturbação aplicada no caso básico (sem compensação), obtém-se o resultado para os ângulos apresentado na figura 5.6.

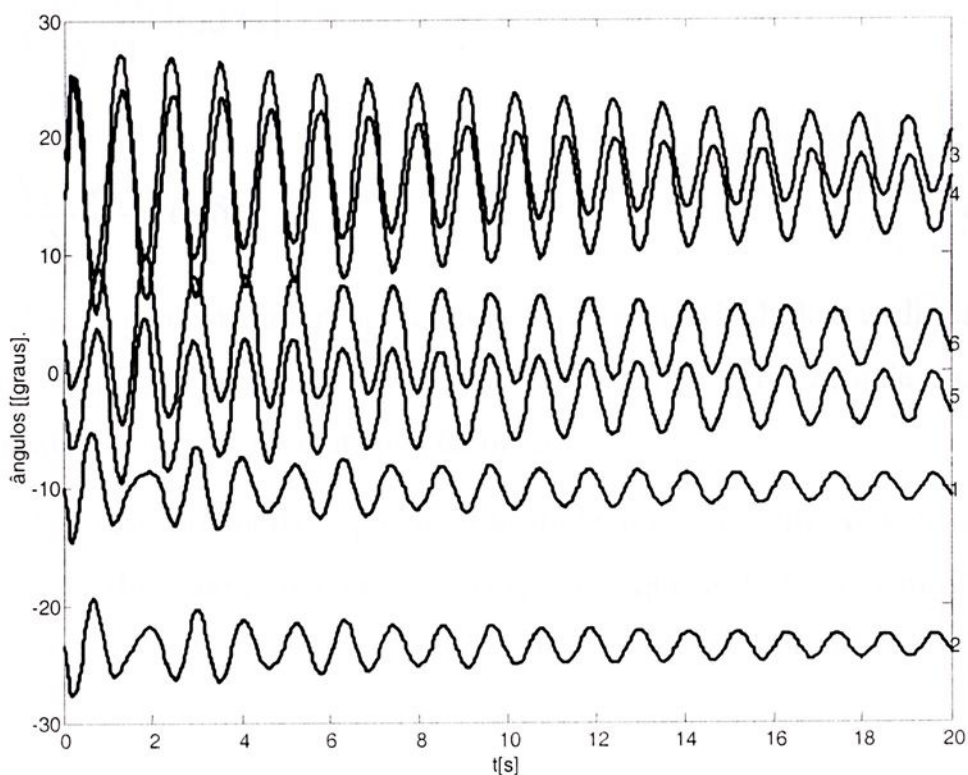


Figura 5.6 – O comportamento do ângulo interno de cada máquina do sistema (segundo caso).

Verifica-se que o comportamento ao longo da simulação, como antes, tende à estabilidade, ainda com amortecimento muito fraco, porém com as amplitudes dos ângulos internos das máquinas consideravelmente reduzidos e com um aumento da frequência de oscilação. Este resultado não deve surpreender à vista dos bem conhecidos resultados do estudo do sistema MBI

[9], uma vez que a redução da reatância da linha compensada leva a um acréscimo de torque sincronizante e este, segundo aquele estudo, implica em elevação da frequência de oscilação, como se explicita a seguir.

Por ter-se feito uma compensação na linha de 40% de sua reatância, houve uma melhora no sincronismo por causa do aumento da frequência de oscilação. Analiticamente pode ser demonstrado pela frequência de oscilação não amortecida, que é, para um sistema MBI: [9].

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_1 \cdot \omega_0}{2 \cdot H}} [\text{rad/s}] \quad (5.01)$$

e

$$K_1 = \frac{V_k \cdot V_m}{X_T} \cdot \cos \delta_{km} \quad (5.02)$$

onde K_1 é inversamente proporcional a reatância da linha, e diretamente proporcional a ω_n . Por esta razão ocorre o aumento da frequência de oscilação, em virtude da redução da reatância da linha.

Pelo mesmo motivo que foi mostrado no caso sem compensação, a variação do fluxo de potência ativa, corrente e queda de tensão, mostram-se neste caso respectivamente na figura 5.7, 5.8 e 5.9 para a falta na barra #7.



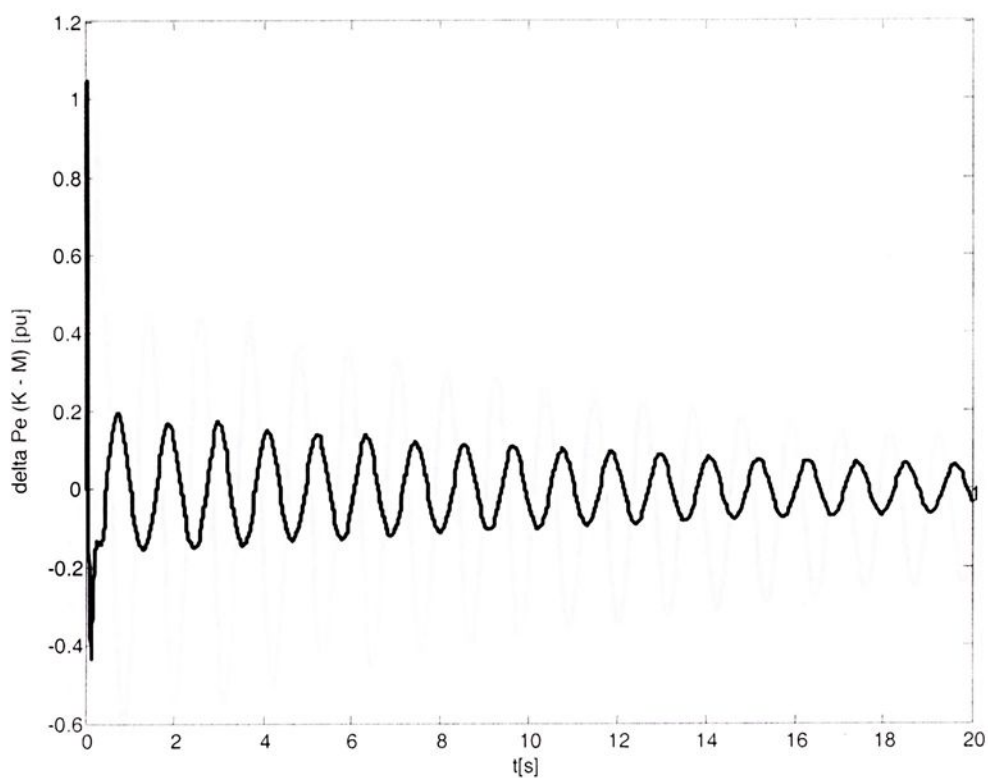


Figura 5.7 – A variação do fluxo de potência da linha (5-6) em relação ao tempo.

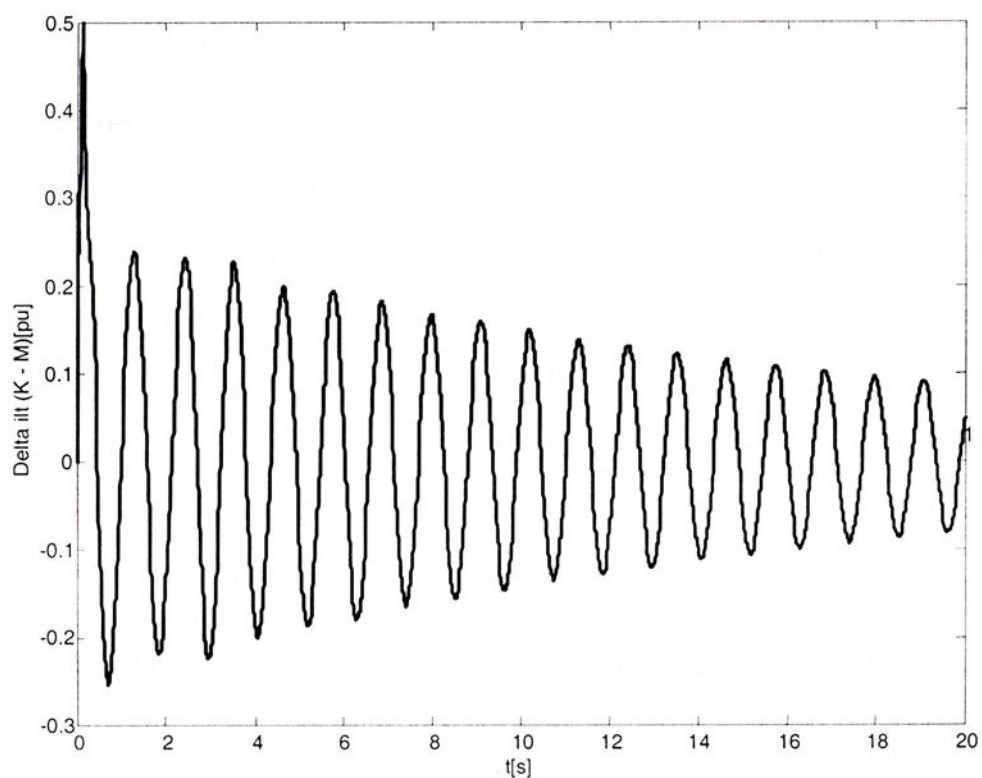


Figura 5.8 – Desvio da magnitude de corrente na linha (5-6) em relação tempo.

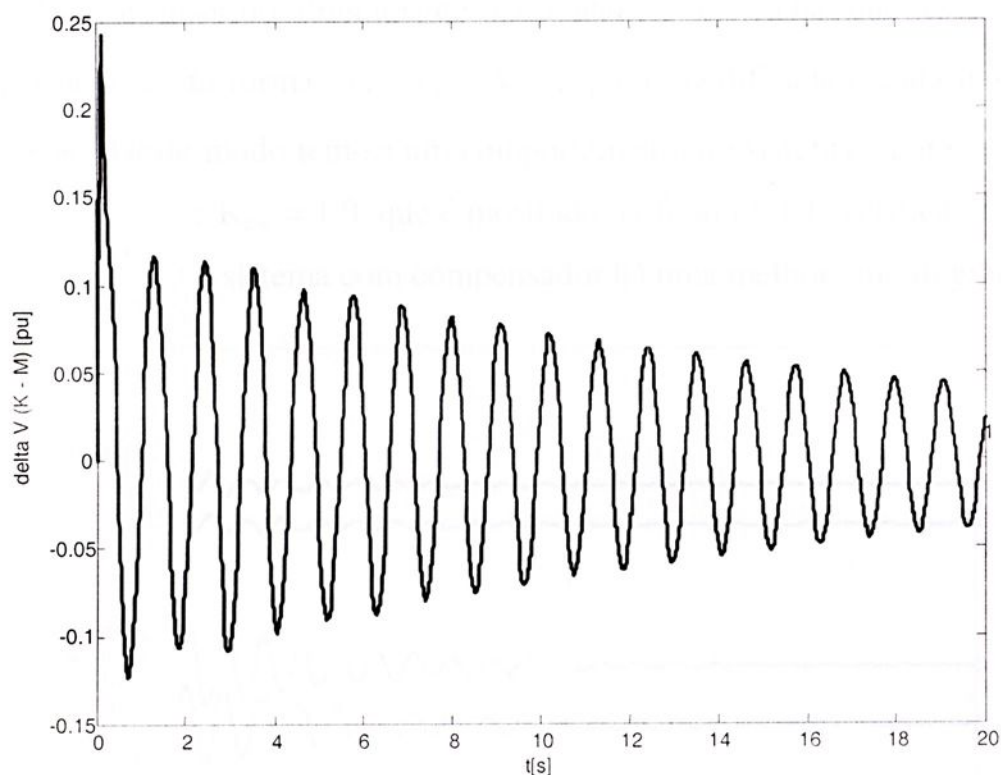


Figura 5.9 – Desvio da magnitude de tensão na linha (5 –6) em relação tempo

5.2. Compensação Proporcional.

Introduz-se uma compensação controlada, neste caso por uma variação da reatância do TCSC definida como proporcional a uma variável de entrada.

Tem-se uma compensação inicial (fixa) da linha de 40%, e a variação Δx_{csc} terá uma variação de no máximo $\pm 40\%$ em relação à reatância indutiva total da linha, que será o limite usado desta variação. Isso é válido para todos os demais casos.

Diversas entradas são consideradas, como segue.

5.2.1. Entrada: Desvio do fluxo de potência elétrica (caso 03)

Neste caso tem-se uma compensação com ganho proporcional, é simplesmente dada por: $\Delta x_{csc} = K_{csc} \times \Delta P_{km}$.

Δx_{csc} é inserido diretamente na reatância da linha que está sendo compensada, desta forma: $x_{li} = x_{lto} - \Delta x_{csc}$, que é modificada a cada passo de integração. Deste modo tem-se um comportamento do sistema, agora com um ganho negativo de $K_{csc} = 1.0$, que é mostrado na figura 5.10. Verifica-se que o comportamento do sistema com compensador há uma melhora muito grande

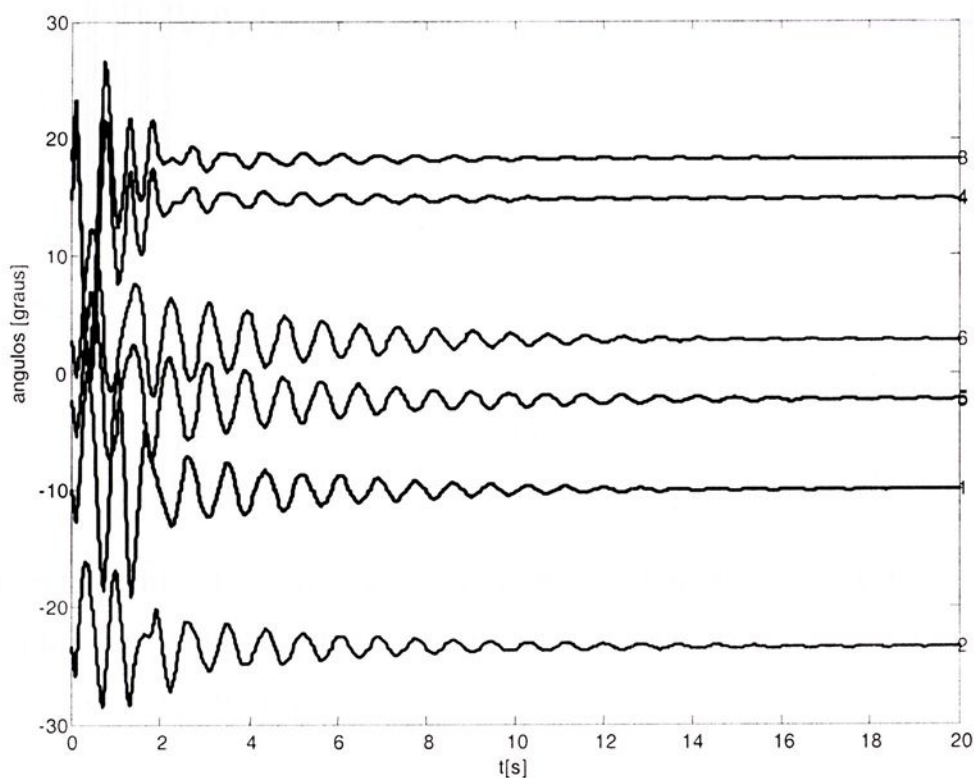


Figura 5.10 – O comportamento do ângulo interno de cada máquina do sistema

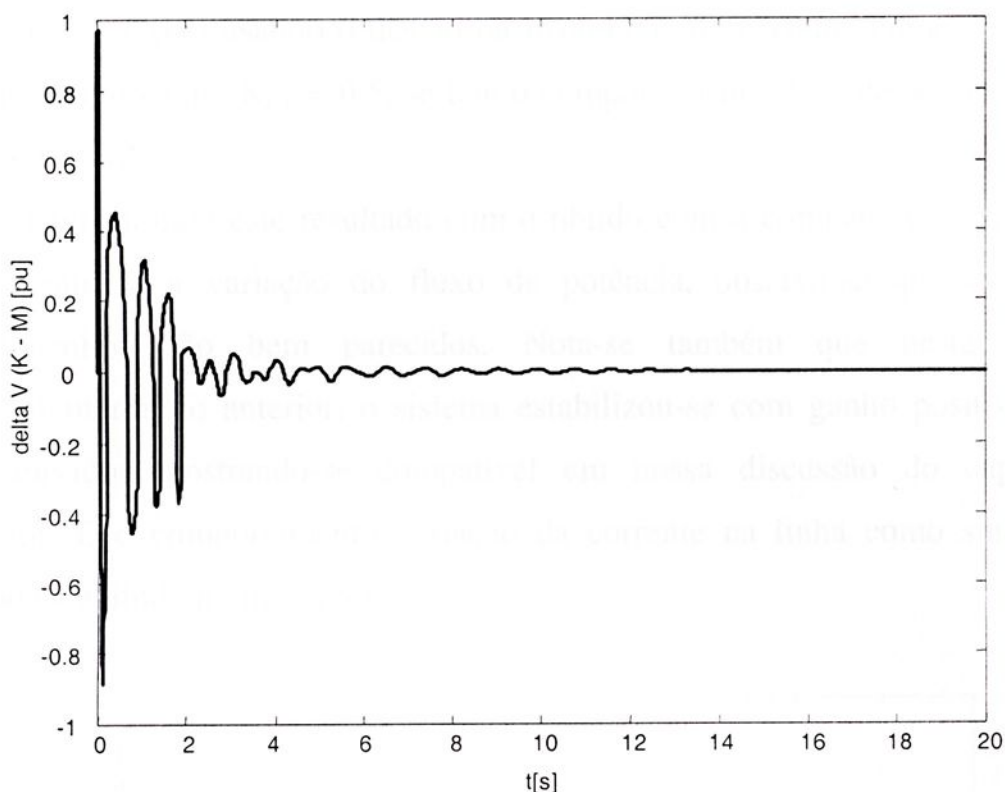


Figura 5.11 – Desvio do fluxo de potência na linha com compensação proporcional.

do amortecimento em relação casos anteriores. Além disso, o resultado estável foi obtido com ganho negativo para que possa se tornar estável, por razões de fase dos sinais envolvidos.

5.2.2. Entrada: Desvio da magnitude da corrente (caso 04)

Usa-se neste caso a variação do valor absoluto da corrente como sinal de entrada, desta forma:

$\Delta x_{csc} = \Delta I_{km} \times K_{csc} \rightarrow \Delta x_{csc}$ limitado e depois é inserido na reatância da linha.

$$Z_{li} = r_{li} + j.x_{li} \rightarrow x_{li} = x_{li0} - \Delta x_{csc} \quad (5.03)$$

Deste modo usando o desvio da magnitude da corrente como sinal de entrada e um ganho $K_{csc} = 0.5$, se tem o comportamento do sistema mostrado na figura 5.12.

Comparando este resultado com o obtido com o compensador que usa como entrada a variação do fluxo de potência, observa-se que os seus desempenhos são bem parecidos. Nota-se também que neste caso, diferentemente do anterior, o sistema estabilizou-se com ganho positivo do compensador mostrando-se compatível em nossa discussão do capítulo anterior. E o comportamento variação da corrente na linha como sinal de entrada é exibido na figura 5.13.

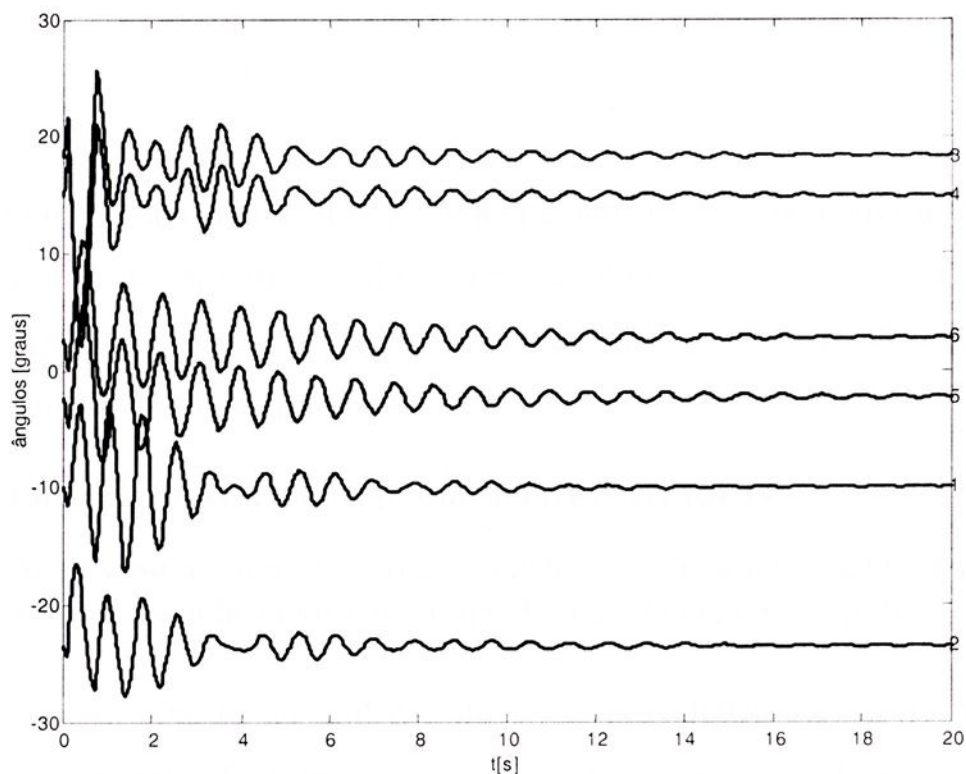


Figura 5.12 – O comportamento do ângulo interno de cada máquina do sistema com o compensador.

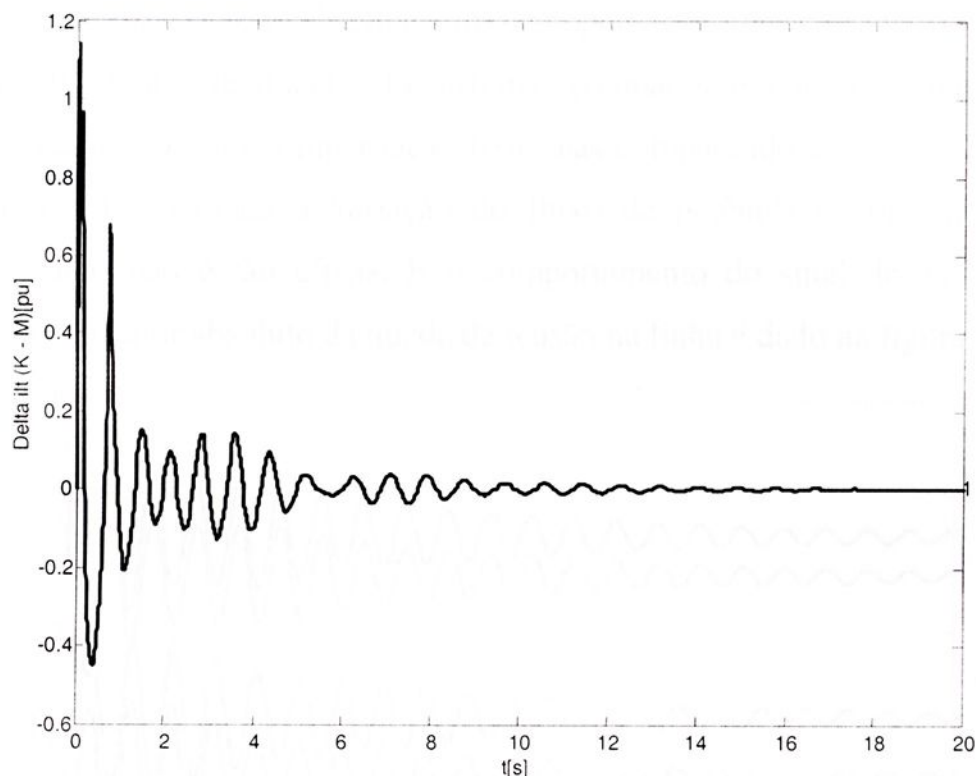


Figura 5.13 - Variação da corrente em relação ao tempo

O modo de como a linha se comporta demonstra como houve a melhora significativa no sistema, o dispositivo estabilizou o sistema após uma perturbação (curto-circuito) no sistema, retornando ao ponto de equilíbrio exatamente o mesmo de pré-falta.

5.2.3 Entrada: Desvio da magnitude da tensão (caso 05)

Neste caso a compensação com ganho puro, é simplesmente dada por:
 $\Delta x_{csc} = K_{csc} \times \Delta V_{km}$ (aplicando-se um limitador na saída em Δx_{csc} [pu]).

Δx_{csc} é inserido diretamente em série na reatância da linha que está sendo compensada, desta forma: $x_{lt} = x_{lto} - \Delta x_{csc}$ e é modificada a cada passo de integração. Para este caso o comportamento do sistema visto através do ângulo interno de cada máquina por um curto-circuito na barra #7 é mostrado na Figura 5.14, com um $K_{csc} = 1.5$.

A simulação deste sistema com o compensador série capacitivo melhora em muito o amortecimento do sistema, comparando com o sistema sem compensação ou com compensação fixa, mas comparando com compensador que usa como entrada a variação do fluxo de potência e corrente o seu desempenho não é tão eficaz. E o comportamento do sinal de entrada da variação do valor absoluto da queda de tensão na linha é dado na figura 5.15.

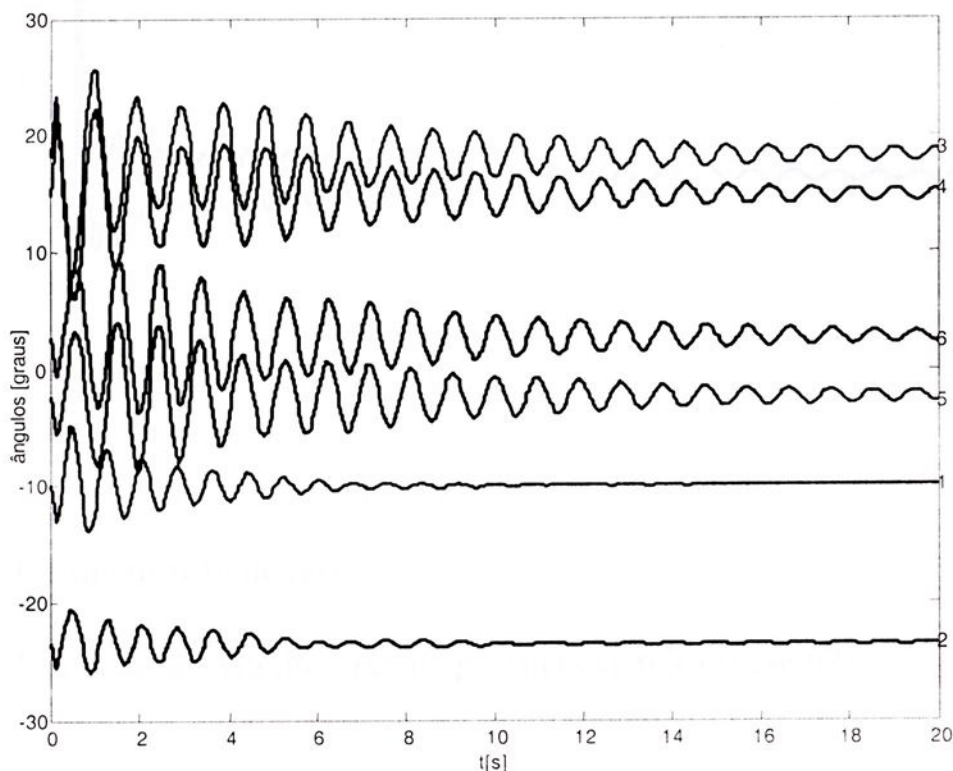


Figura 5.14 – O comportamento do ângulo interno de cada máquina do sistema em relação ao tempo

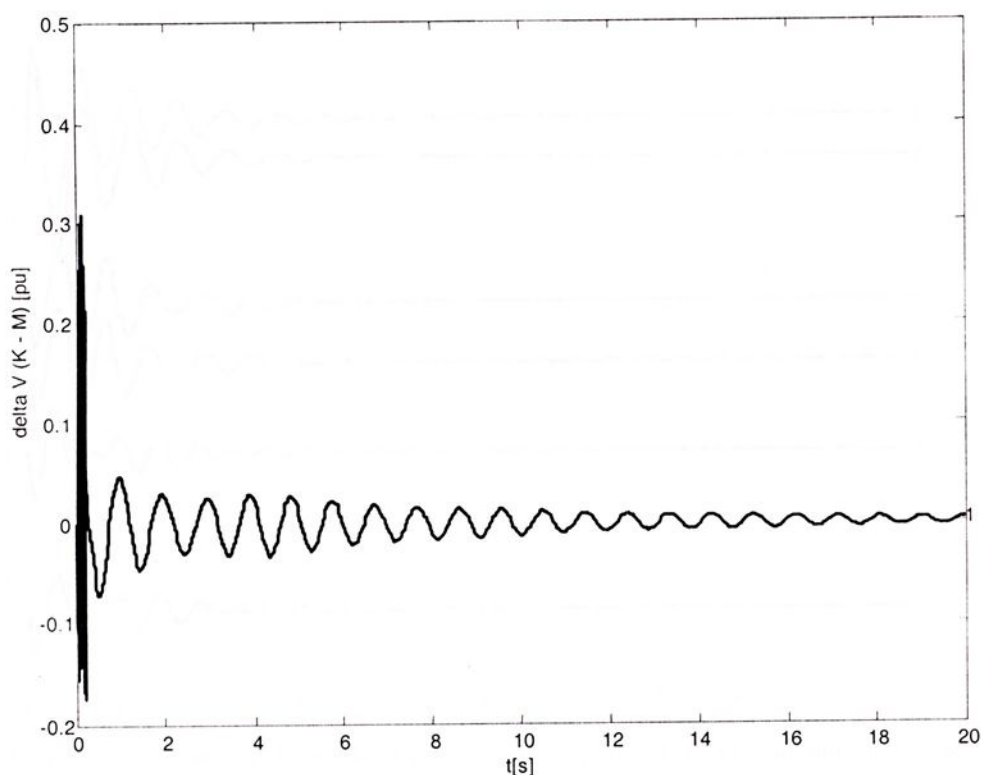


Figura 5.15 – Variação da queda de tensão em relação ao tempo

5.3. Compensação de fase.

5.3.1. Entrada: desvio do fluxo de potência elétrica (caso 07)

Com a estrutura do compensador dado pelo lead-lag e definido ΔP_{km} como sinal de entrada, se obtém o resultado mostrado na figura 5.16.

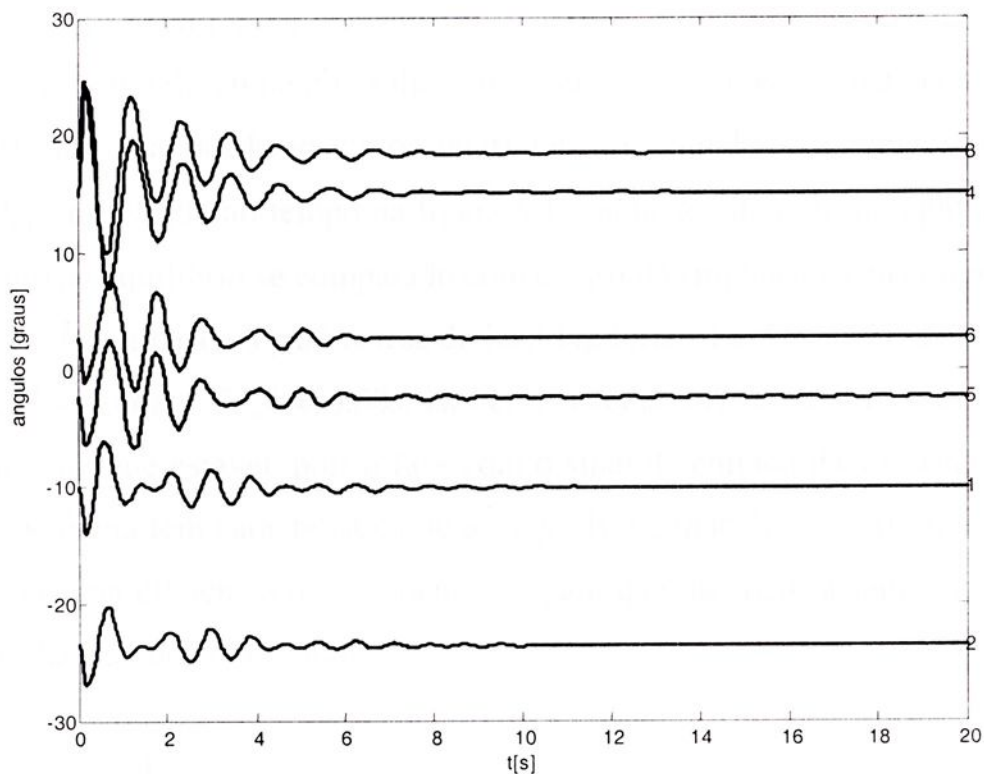


Figura 5.16 - O comportamento do ângulo interno de cada máquina do sistema com um compensador como variável de estado

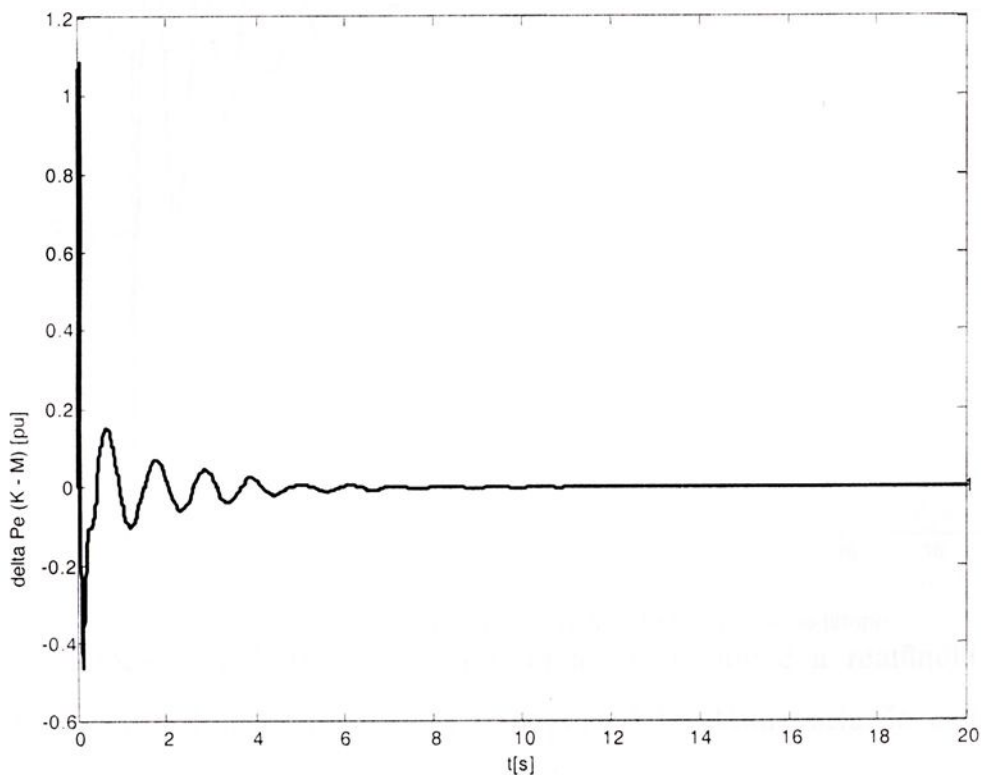


Figura 5.17 - ΔP_{km} em relação ao tempo na linha (5-6)

Houve um amortecimento considerável e a sua frequência de oscilação teve um grande aumento. Salientando que se usam as mesmas condições de perturbação aplicada aos casos anteriores, observando-se o comportamento de ΔP_{km} em relação ao tempo na figura 5.17, nota-se que retorna rapidamente ao ponto de equilíbrio se comparado com o caso da simulação sem compensação.

Neste caso os parâmetros do lead-lag foram $T_{c_1} = 0.06s$, $T_{c_2} = 0.50s$, $T_{c_3} = 0.06s$ e $T_{c_4} = 0.50s$, isto é, o sistema utiliza um atraso de fase para que continue estável, pois a fase com o sinal de entrada da variação do fluxo de potência tem característica de avanço. E o ganho $K_{csc} = 2.0$ foi usado para se ter uma eficiência do compensador para que não ocorra saturação e nem a inutilização do controlador.

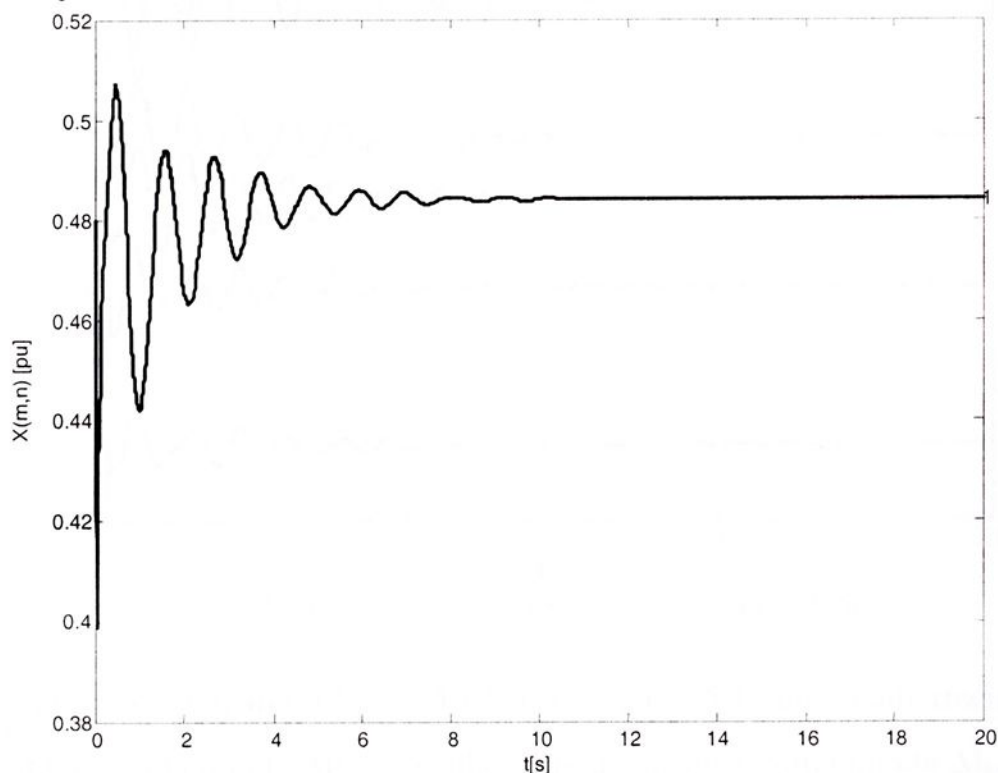


Figura 5.18 – Variação da reatância da linha em relação ao tempo

Pode-se também comparar com a saída, que é a reatância da linha propriamente dita, como mostra na figura 5.18. Esta variação está em fase com a velocidade se G_{comp} contiver um atraso de fase.

5.3.2. Entrada: desvio magnitude da corrente (caso 08)

Aplica-se na entrada a variação da corrente. E neste caso permite comparar qual das entradas dará melhores resultados, isto é, um melhor desempenho neste sistema. Então na figura 5.19 têm-se os ângulos internos de cada máquina em relação ao tempo, que mostra o comportamento do sistema usando a entrada do desvio do valor absoluto da corrente.

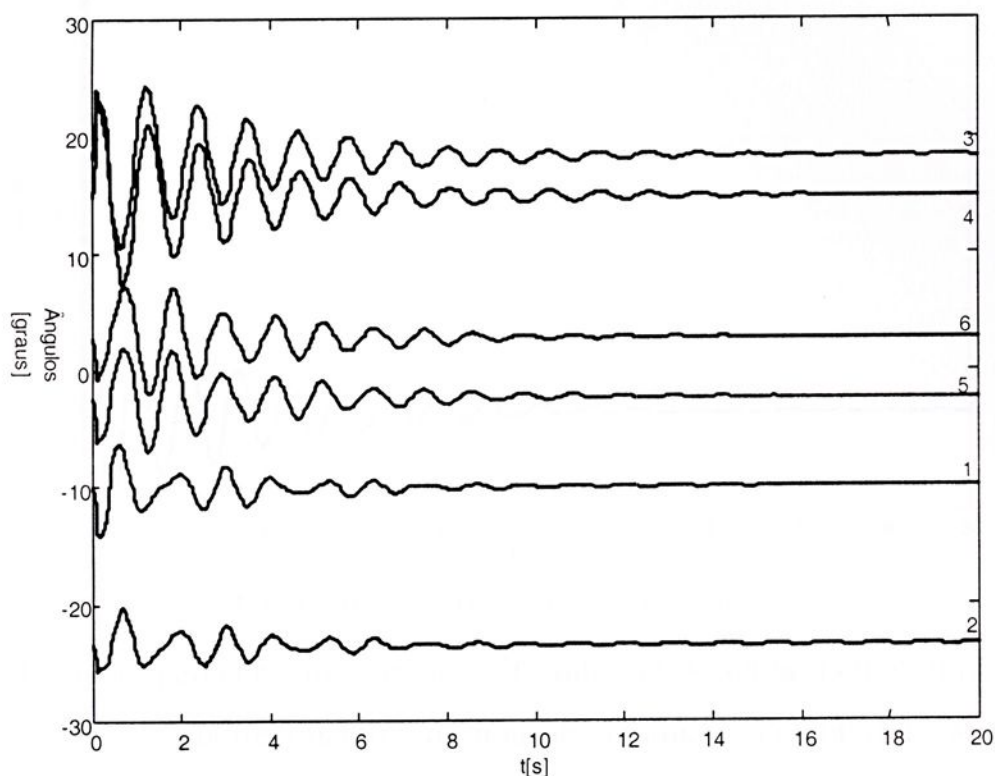


Figura 5.19 – Ângulos internos de cada máquina em relação ao tempo

Pode-se comparar a figura 5.19 com a figura 5.16 que o amortecimento no sistema com entrada ΔP_{km} é melhor que do sistema com entrada ΔI_{km} uma vez que o sistema tem características de atraso de fase os blocos devem ser de avanço de fase. No sistema com entrada ΔI_{km} utilizou-se um avanço de fase, isso significa que o sistema tem característica de atraso de fase, as entradas do

lead-lag foram: $T_{c_1} = 0.50s$, $T_{c_2} = 0.06s$, $T_{c_3} = 0.50$ e $T_{c_4} = 0.06s$. Além de um ganho $K_{csc} = 0.012$, para que o sistema permaneça estável. Tem-se também que observar a entrada do sistema, mostrada na figura 5.20 que é a variação da corrente em relação ao tempo de simulação.

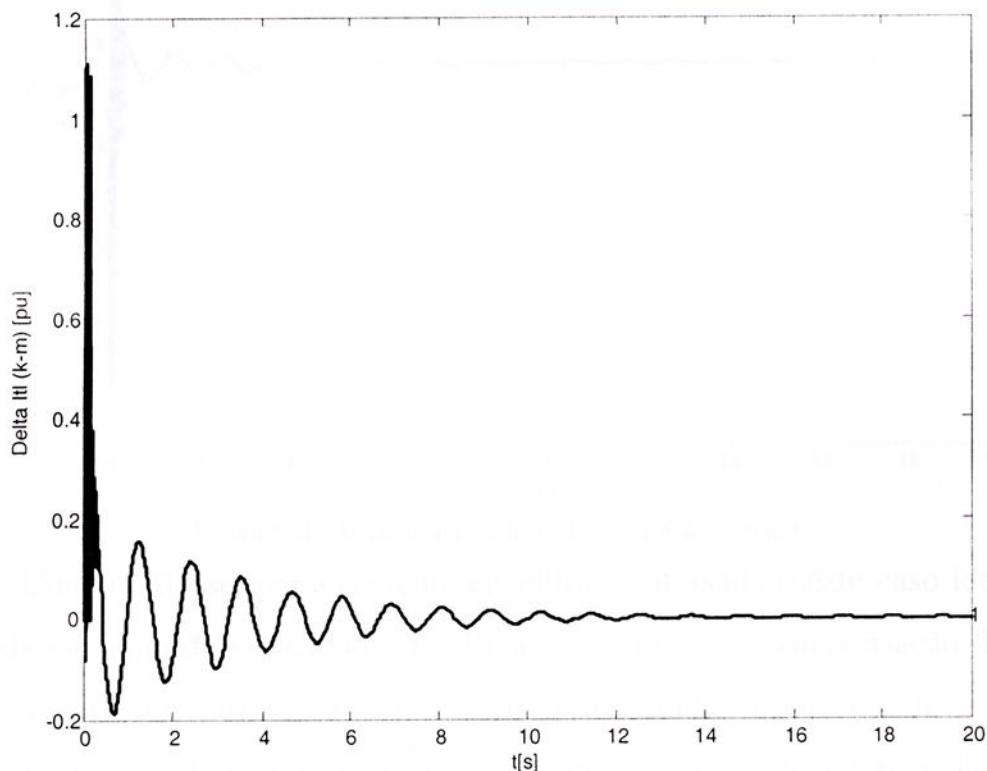


Figura 5.20 – Variação corrente em relação tempo.

Pode-se perceber na figura 5.20 que no sistema houve uma leve diminuição do amortecimento em relação à simulação anterior. Mas em relação aos outros se uma melhora considerável em seu amortecimento. Também não se pode deixar de comparar a reatância da linha com a da entrada ΔP_{km} , coloca-se Δx_{csc} como uma variável de estado, que está expressa no gráfico 5.21.

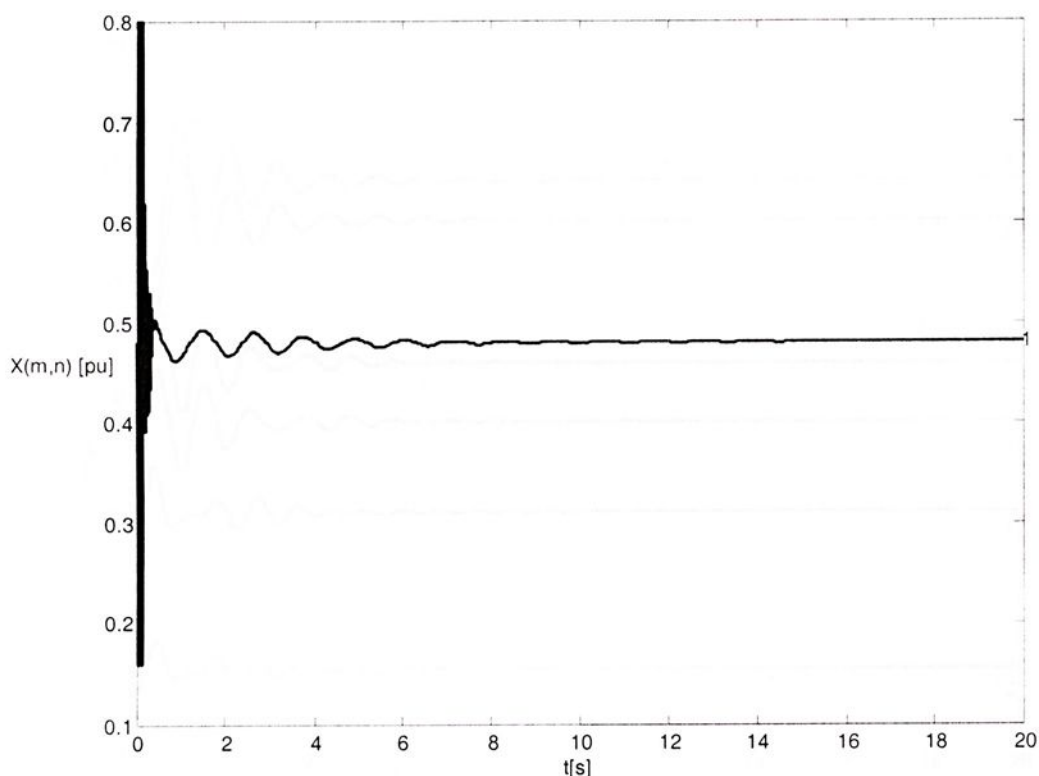


Figura 5.21 – Reatância da linha (5-6) em relação ao tempo

Concluindo-se que a corrente encontra-se atrasada (neste caso ideal, de 90°) da variação da velocidade. Justifica-se então que a compensação de fase G_{comp} no caso de variável de entrada no compensador a corrente deva ser de avanço para se obter um sinal em fase com a velocidade relativa das duas máquinas (ou duas áreas).

5.3.3 Entrada: Desvio da magnitude da queda de tensão (caso 09)

Aplicando como entrada desvio da magnitude da queda de tensão, e fazendo novamente a simulação de contingência, pode-se comparar qual das três entradas dará melhores resultados, isto é, um melhor desempenho dinâmico neste sistema. Então na figura 5.22 tem-se os ângulos internos de cada máquina em relação ao tempo, que mostra o comportamento do sistema com a entrada da variação da queda de tensão na linha.

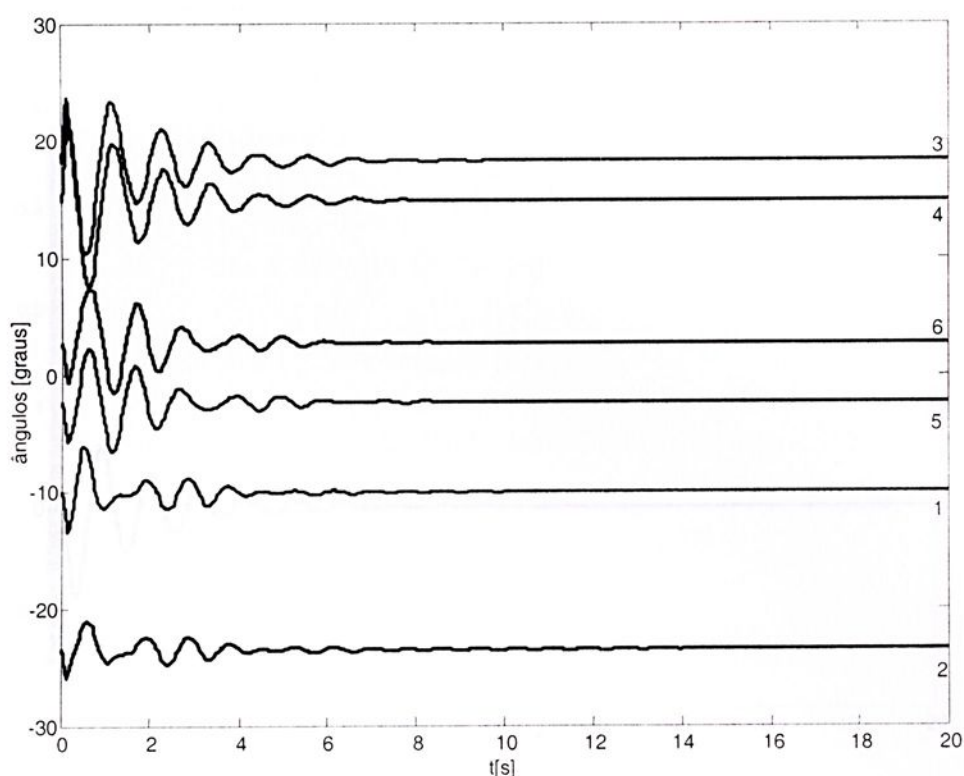


Figura 5.22 – Ângulos internos de cada máquina em relação ao tempo

Pode-se observar que de fato considerar a queda de tensão e a corrente é fundamentalmente o mesmo. Veja que $\Delta V = X \Delta I$. Então, basta ajustar o ganho e um é exatamente igual ao outro como na figura 5.22 com a figura 5.19 que se têm resultados iguais com a entrada ΔI_{km} , mesmo assim pode-se constatar que a entrada ΔP_{km} também é melhor que do sistema com entrada ΔV_{km} . No sistema com entrada ΔV_{km} utilizou-se um avanço de fase, isso significa que o sistema estava com um atraso de fase, as entradas do lead-lag foram: $Tc_1 = 0.50s$, $Tc_2 = 0.09s$, $Tc_3 = 0.50$ e $Tc_4 = 0.09s$. Isto foi exigido além de um ganho $k_{csc} = 0.055$, para que o sistema permaneça estável. Tem-se também que observar a entrada do sistema, mostrada na figura 5.23 que é a variação da queda de tensão em relação ao tempo de simulação.

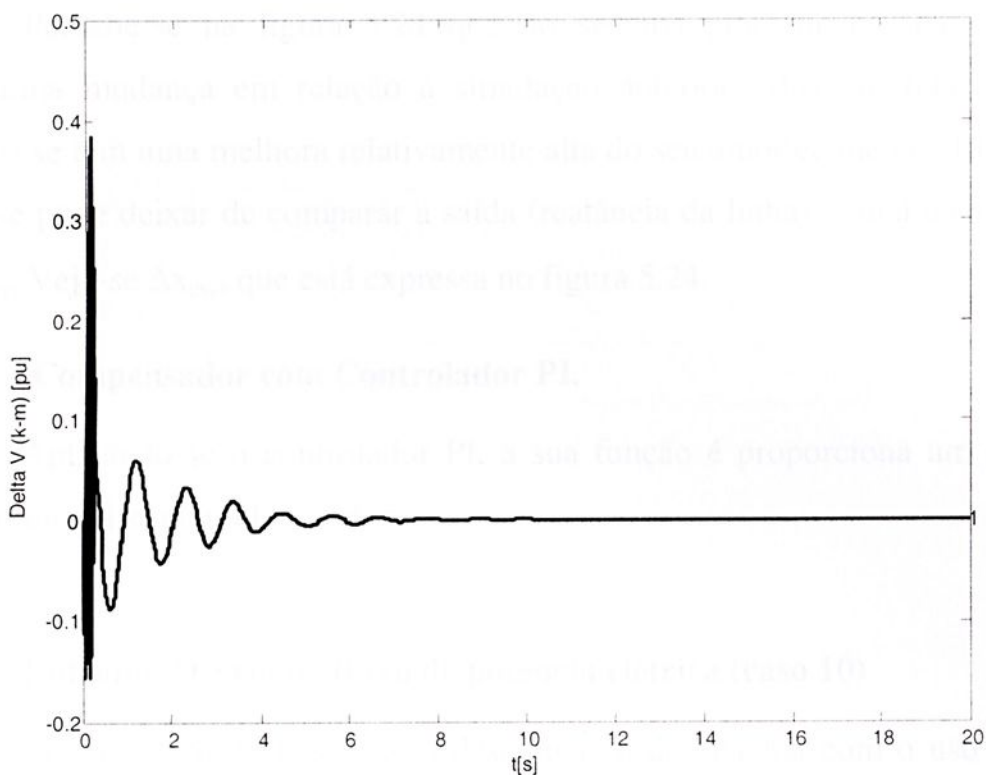


Figura 5.23 – Variação da queda de tensão em relação tempo.

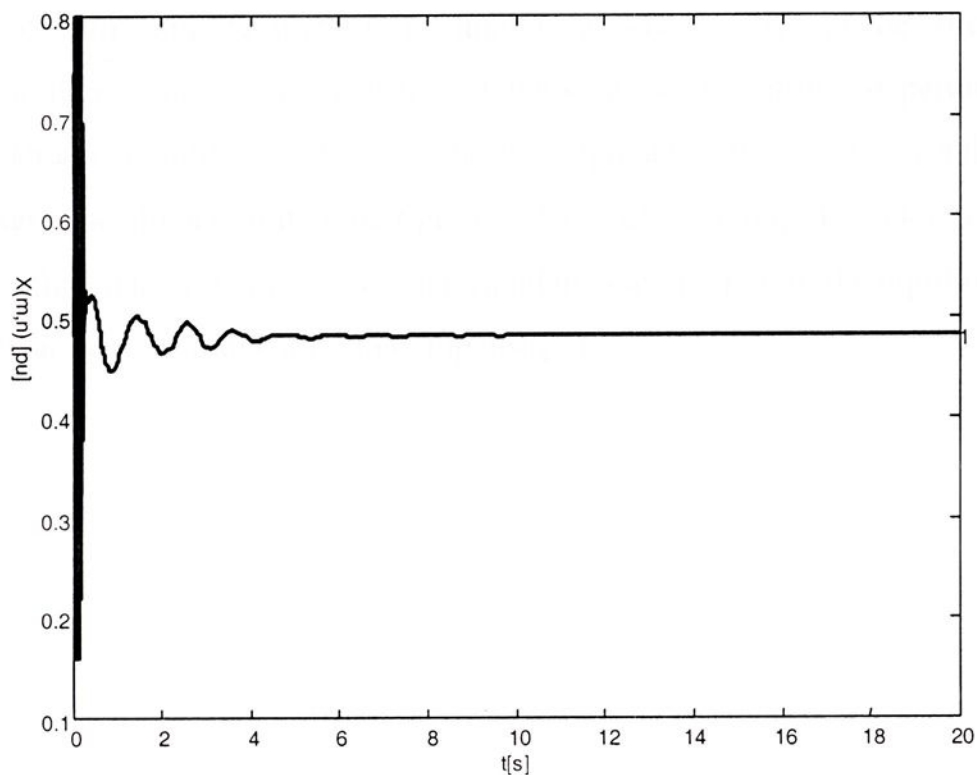


Figura 5.24– Reatância da linha (5-6) em relação ao tempo

Percebe-se na figura 5.24 que no sistema praticamente não houve nenhuma mudança em relação à simulação anterior. Mas em relação aos outros se tem uma melhora relativamente alta do seu amortecimento. Também não se pode deixar de comparar a saída (reatância da linha) com a da entrada ΔV_{km} . Veja-se Δx_{csc} , que está expressa no figura 5.24.

5.4. Compensador com Controlador PI.

Aplicando-se o controlador PI, a sua função é proporcionar um ganho proporcional e integral ao sistema.

5.4.1 Entrada: Desvio do fluxo de potência elétrica (caso 10)

Na figura 5.25 mostra-se o desempenho do sistema com o uso do PI com a uma entrada ΔP_{km} e $K_p = -1.0$ e $K_i = 1.0$. A simulação demonstra que além de um amortecimento acentuado, a sua frequência de oscilação aumentou em relação aos casos de compensação sem controle. A perturbação considerada continua sendo a mesma aplicada às outras simulações. Apresenta-se ainda o gráfico na figura 5.26 de ΔP_{km} em relação ao tempo onde se verifica que a variável retorna rapidamente ao ponto de equilíbrio se comparar com a simulação sem compensação.



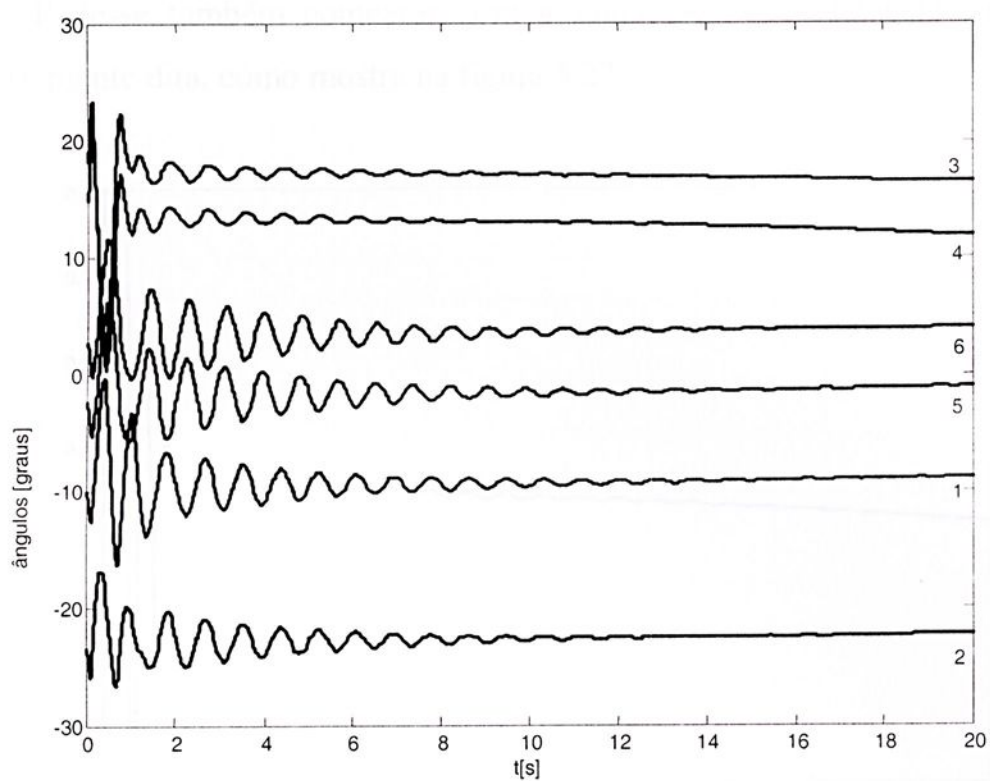


Figura 5.25 - O comportamento do ângulo interno de cada máquina do sistema com o controlador PI.

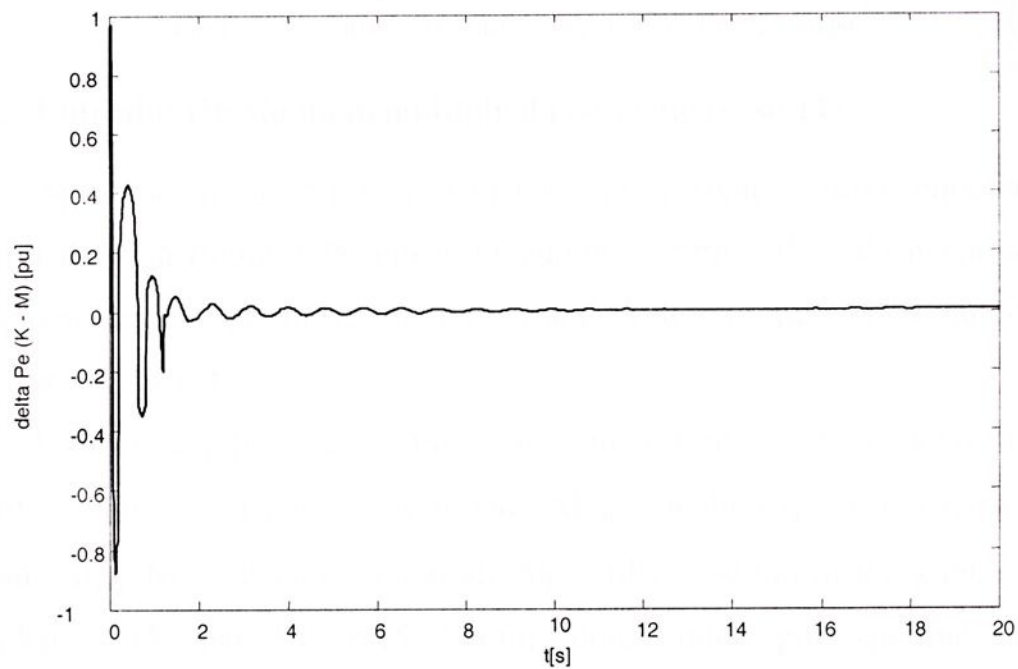


Figura 5.26- ΔP_{km} em relação ao tempo na linha (5-6)

Pode-se também comparar com a saída, que é a reatância da linha propriamente dita, como mostra na figura 5.27.

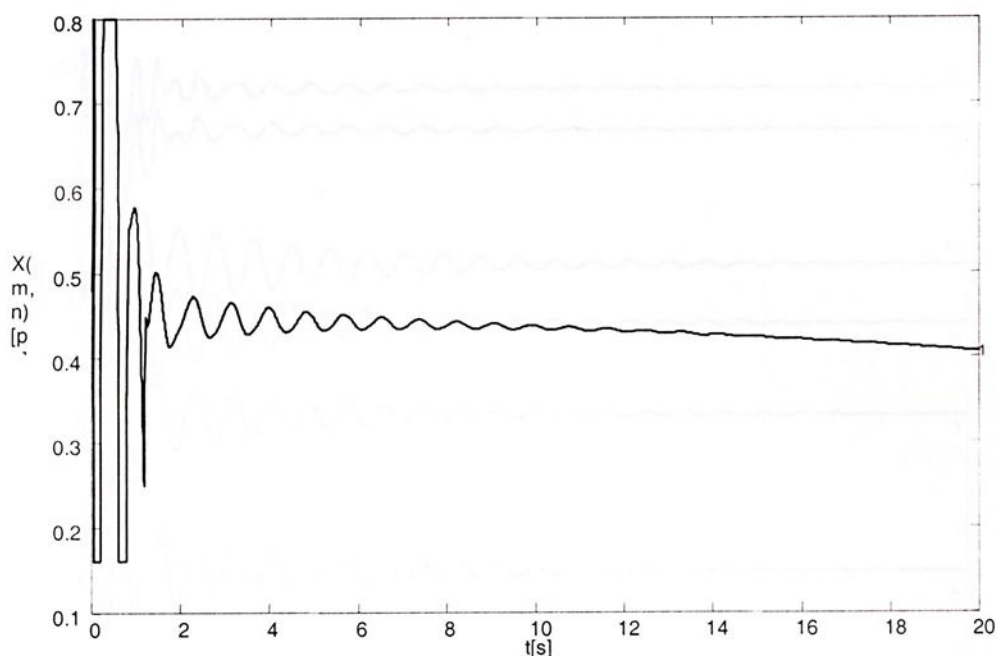


Figura 5.27 – Variação da reatância da linha em relação ao tempo

5.4.2 Entrada: Desvio da magnitude da corrente (caso 11)

Aplica-se neste caso a variação da corrente como entrada do controlador. Na figura 5.28 tem-se os ângulos internos de cada máquina em relação ao tempo, que mostra o comportamento do sistema com a entrada da variação da corrente.

Pode-se comparar a figura 5.28 com a figura 5.25 e notar que o amortecimento no sistema com entrada ΔP_{km} é melhor que do sistema com entrada ΔI_{km} . No sistema com entrada ΔI_{km} utilizou-se um menor ganho tanto para $K_p = 0.75$ e para $K_i = 0.15$. Foram valores obtidos por experimentações, para que o sistema permaneça estável. Tem-se também que observar a entrada

do sistema, mostrada na figura 5.29 que é a variação da corrente em relação ao tempo de simulação.

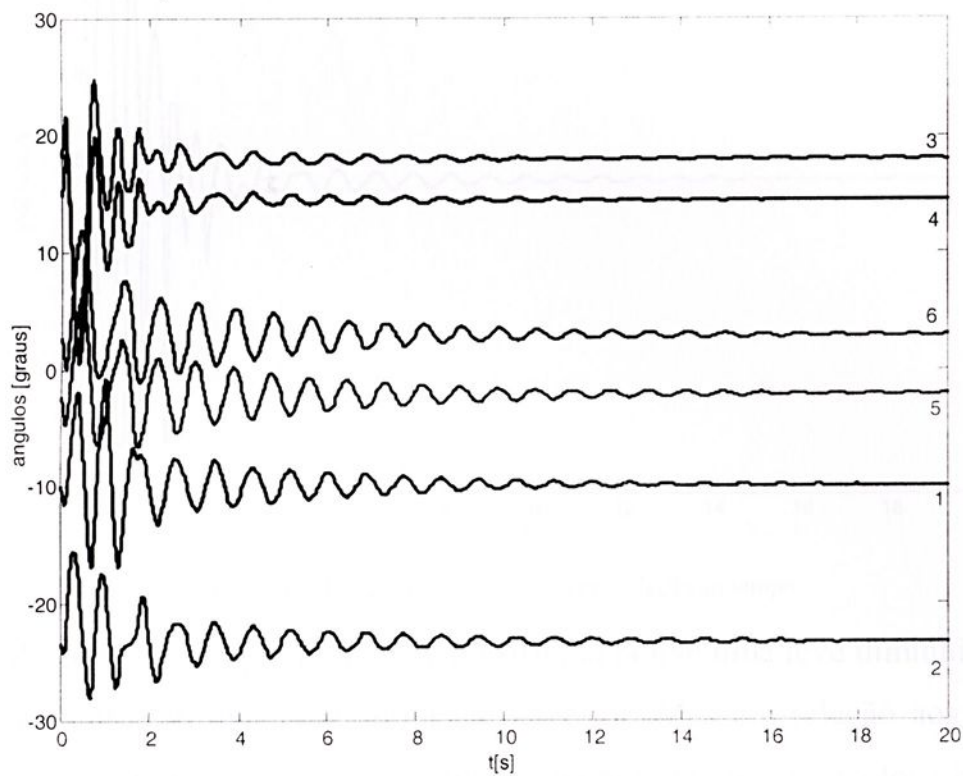


Figura 5.28 – Ângulos internos de cada máquina em relação ao tempo

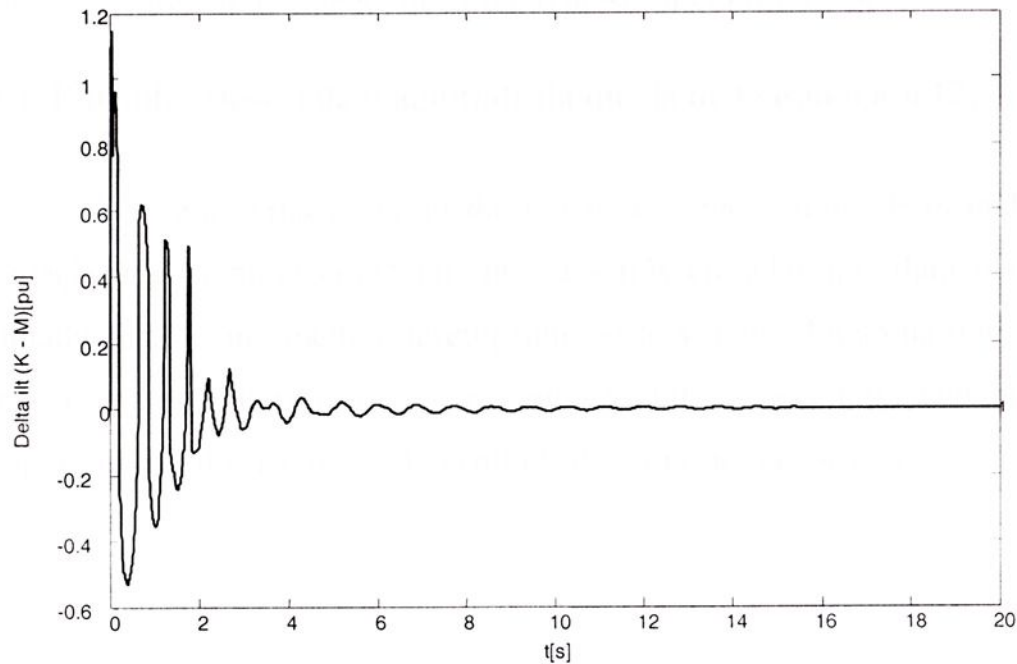


Figura 5.29 – Variação corrente em relação tempo.

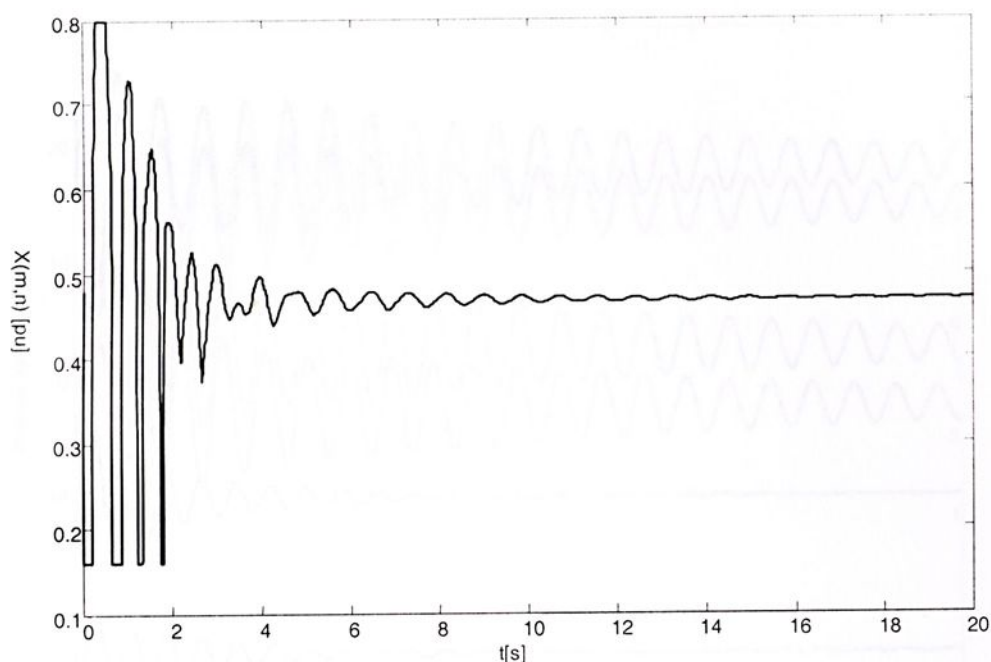


Figura 5.30 – Reatância da linha (5-6) em relação ao tempo.

Percebe-se na figura 5.28 que no sistema houve uma leve diminuição do amortecimento em relação à simulação anterior. Mas em relação aos outros temos uma melhora relativamente alta do seu amortecimento. Coloca-se Δx_{csc} como uma variável de estado, que está expressa no gráfico 5.30.

5.4.3 Entrada: Desvio da magnitude da queda de tensão (caso 12)

Aplica-se a variação da queda de tensão como entrada. E fazendo esta simulação nos permite comparar qual das três entradas nos dará melhores resultados, isto é, um melhor desempenho neste sistema. Então na figura 5.31 temos os ângulos internos de cada máquina em relação ao tempo, que mostra o comportamento do sistema com a entrada da variação da corrente.

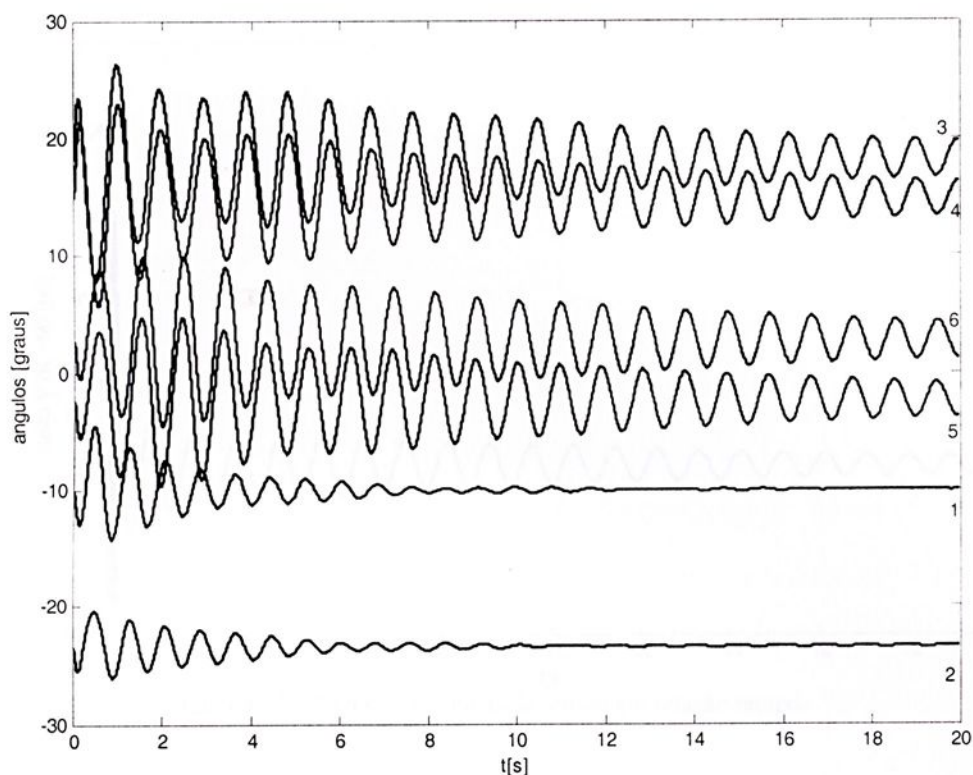


Figura 5.31– Ângulos internos de cada máquina em relação ao tempo

Pode-se observar e comparar a figura 5.31 com a simulação feita sem o lead-lag (compensação pura) que se tem resultados muito parecidos com a entrada, mesmo assim pode-se constatar que a entrada ΔP_{km} também é melhor que do sistema com entrada ΔV_{km} . No sistema com entrada ΔV_{km} utilizou-se um $K_p = 1.5$ e $K_i = 1.5$, para que o sistema permaneça estável.. Na figura 5.32 observa-se os resultados são bastante próximos dos obtidos na simulação com ganho puro. Δx_{csc} é apresentado no gráfico 5.33.

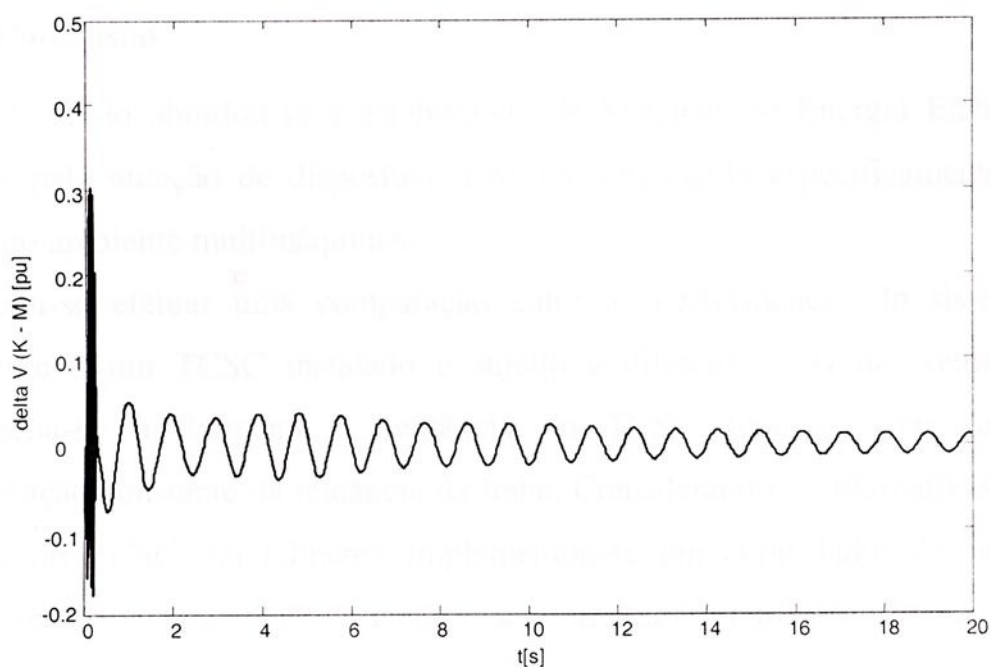


Figura 5.32 – Variação da queda de tensão em relação tempo.

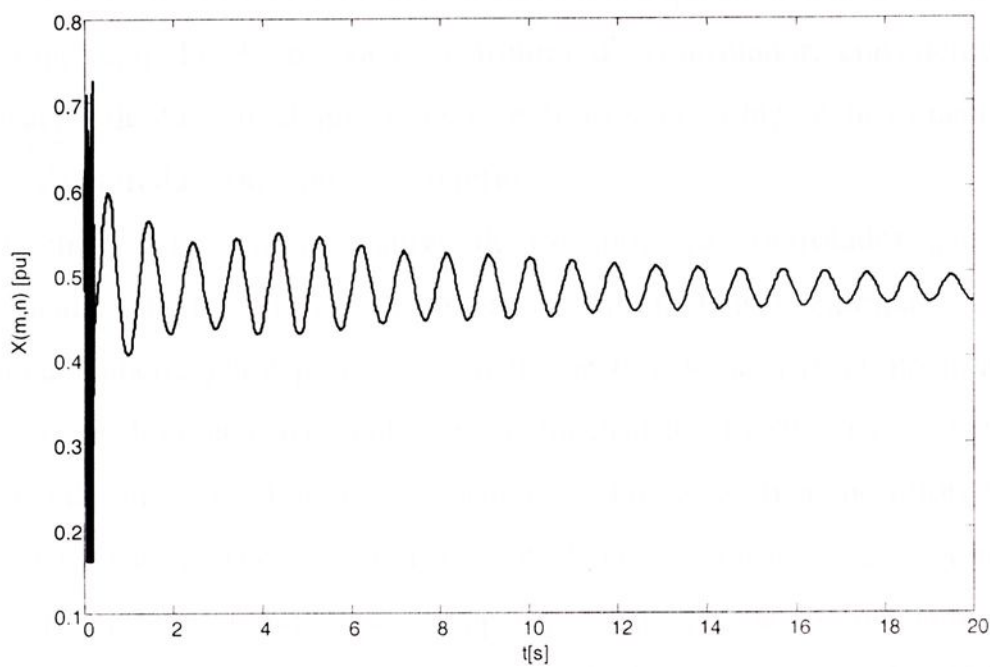


Figura 5.33 – Reatância da linha (5-6) em relação ao tempo

6. Conclusão

Neste estudo abordou-se a estabilidade de Sistemas de Energia Elétrica afetados pela atuação de dispositivo FACTS, enfocando especificamente o TCSC, no ambiente multimáquinas.

Buscou-se efetuar uma comparação entre as performances do sistema considerando um TCSC instalado e sujeito a diferentes leis de controle. Considerou-se inicialmente a reatância do TCSC fixa, ou seja, uma compensação constante da reatância da linha. Considerando as alternativas de controle do TCSC, inicialmente implementou-se um controlador de saída proporcional a variações da entrada, ou seja, um ganho puro. Nesta situação, definiu-se alternativamente como entrada a variação da potência ativa na linha, a variação da corrente na linha e a variação da queda de tensão na linha.

Em uma segunda alternativa de estrutura do controlador, considerou-se compensação de fase mediante o uso de blocos Lead-lag, e novamente a definição de entradas como no caso anterior.

Finalmente, a terceira alternativa de estrutura do controlador que foi Proporcional e Integral (PI). Novamente as três alternativas de entradas.

De uma maneira geral pode-se afirmar que o sistema sem compensação alguma é o de dinâmica mais pobre e a compensação, mesmo a fixa, vem a melhorar o desempenho dinâmico do sistema, sendo esta eficaz no reforço do torque sincronizante. Todas as outras, controladas, vem a acrescentar ao torque sincronizante proporcionado pela compensação de regime permanente um torque de amortecimento pela parcela variável da reatância do TCSC. Entretanto é necessário ressaltar que as compensações controladas exigem ajuste criterioso de parâmetros sob pena de poder até mesmo prejudicar a estabilidade do sistema.



Dentre as alternativas de controle que estabilizaram o sistema há que se notar que a de resultados mais pobres quanto ao amortecimento, embora positivos, é a proporcional (ganho puro) e os melhores resultados de amortecimento são propiciados pela compensação de fase. Dentre todas, também se observa que entre as alternativas de variáveis de entrada para diversas estruturas do controlador, a que produz melhores resultados é sistematicamente a variação da potência ativa da linha.

E quanto aos trabalhos futuros pode-se otimizar o sistema e incluir novos dispositivos, como o SVC e PS.



7. Referências.

- [1] Kundur, P.. Power System Stability and Control. Electrical Power Research Institute, MacGraw-Hill, 1994, 1167p.
- [2] Song Y.H., Johns, A. T.. Flexible AC Transmission Systems (FACTS). The Institution of Electrical Engineers, 1999, 592p.
- [3] Anderson P. M.; Fouad A. A.. Power system control and stability. Iwa: The Iowa State University Press; 1997.
- [4] Sauer, P. W.; Pai, M. A.. Power system dynamics and stability. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; 1998.
- [5] Colvara, L. D.; Araujo, S. C. B.; Festrats, E. B.. Stability analysis of power system including facts (TCSC) effects by direct method approach. Electrical Power & Energy Systems – 27, 2005, 264-274p.
- [6] Song, Y. H.; Liu, J. Y.. Modeling of Power Systems For Dynamics Stabilization Studies, IEE, Savoy Place, London WC2R 0BL, UK.
- [7] Tan, Y.L.; Wang, Y.. Effects of FACTS Controller line Compensation. IEEE Power Engineering Review, August 1998. 55-56p.
- [8] Taranto, N. G.; Chow, J. H.. Robust Decentralized Control Design for Damping Power System Oscillations. Conference on Decision and Control, IEEE, 1994, 4080-4085p.
- [9] De Mello, F. P.; Concordia, C.. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control – IEEE PAS Vol. 88/4-April 69.
- [10] Overbye, T. J.; Brown, D.. Use of FACTS Devices for Power System Stability Enhancement, Department of Electrical and Computer



Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1993, IL 61801.

- [11] Festrats E. B.; Colvara L. D.. Consideração da ação de dispositivos FACTS em um Método Automático de Análise de Estabilidade de Sistemas de Energia Elétrica, Dissertação, Departamento de Engenharia Elétrica, FEIS, UNESP, Ilha Solteira, JUN 2002.
- [12] Stagg, G. W.; El-Abiad, A. H.. Computer Methods in Power System Analysis. Mc Graw-Hill, 1968.
- [13] Fan, L.; Feliachi, A.. Robust TCSC Control Design for Damping Inter-Area Oscillations. IEEE, 2001, 784-789p.
- [14] Del Rosso, D. A.; Cañizares, A. D.; Doña, M. V.. A Study of TCSC Controller Desing for Power System Stability Improvement. IEEE Trans. Power Systems, 2002, 1-10p.
- [15] Jiang, D.; Lei, X.. A nonlinear TCSC control strategy for system stability enhancement. Proceedings of the 5th Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM 2000, Hong Kong, October, 576-581p.
- [16] Martins, N.; Pinto, H. J. C. P.; Paserba, J. J.. Using a TCSC for line power scheduling and system oscillation damping – small signal and transient stability studies. IEEE Trans. Power Systems, 2000, 1455-1461p.
- [17] Gama, C.. Brazilian North-South interconnection – Control application and operating experience with a TCSC. IEEE Trans. Power System, 1999, 1103-1108p.





,UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br

