

Análise em Regime Permanente e Dinâmico de um Compensador Síncrono

5.1

Introdução

O objetivo é analisar a possibilidade de um compensador síncrono estar associado à ocorrência de eventos de estabilidade de tensão operando de forma oposta ao esperado no controle de tensão.

Neste capítulo é utilizado o sistema New England, onde será inserido um compensador síncrono. O diagrama unifilar do sistema é apresentado na Figura 5.1.

São observados os sentidos das variações das tensões interna e terminal de um compensador síncrono frente a situações normais de um sistema elétrico, tais como variações de tensão e de carga.

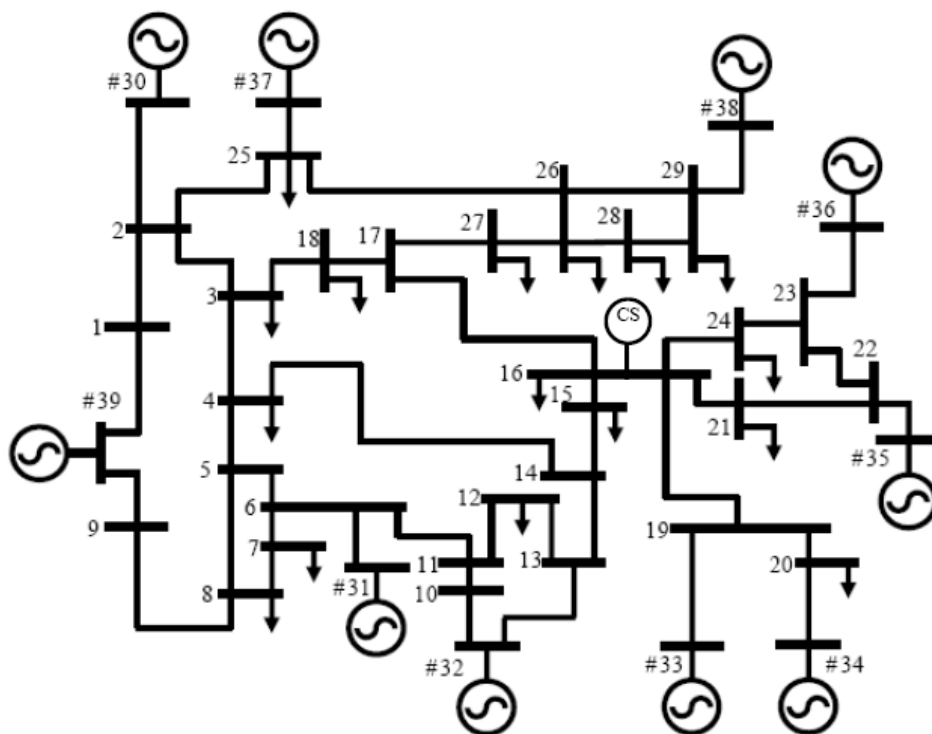


Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema New England com compensador síncrono

Os dados da simulação e do sistema são apresentados no Apêndice B.

5.2

Análise em Regime Permanente

A análise em regime permanente tem o objetivo de coletar pontos de operação na região normal e anormal, verificar a relação existente entre as tensões interna e terminal de um compensador síncrono instalado em uma barra, confirmar a região de operação e utilizar esses pontos na análise no domínio do tempo.

Para determinar em que barra do sistema o compensador síncrono é colocado, é utilizado um ponto de operação do sistema New England na região normal e traçada a curva VQ de todas as barras do sistema através do algoritmo de fluxo de carga do pacote computacional ANAREDE. Analisando o relatório de saída do programa, apresentado na Tabela 5.1, é possível observar que a barra 16 é a que se apresenta com valor de tensão mais próximo à tensão limite para operar de forma oposta ao esperado com a potência reativa gerada. Sendo assim, essa é considerada a barra mais interessante para a instalação do compensador síncrono. A curva VQ da barra 16 é apresentada na Figura 5.2.

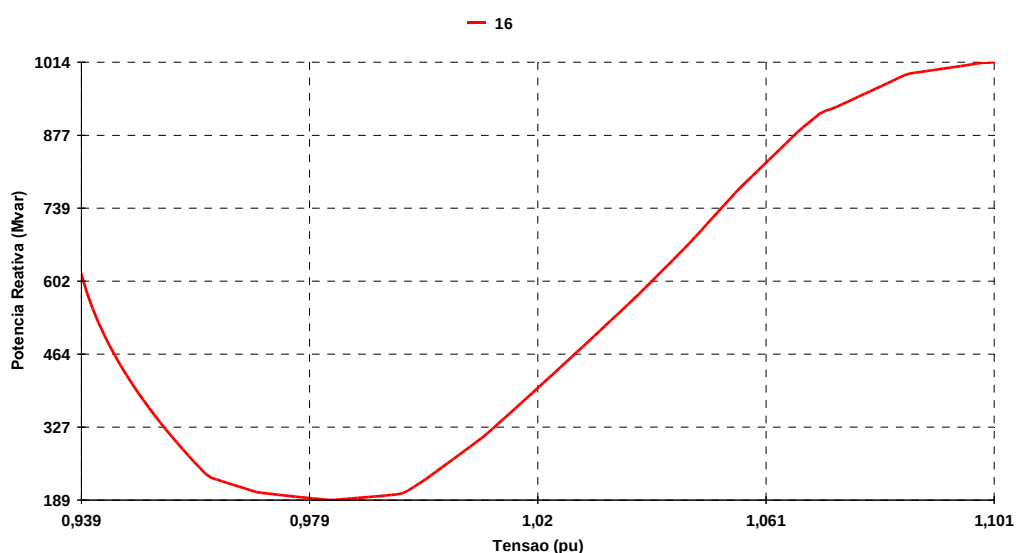


Figura 5.2 – Curva VQ da barra 16

Tabela 5.1 – Resultado de execução da margem de potência reativa na região normal

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V09.01.06

* SISTEMA NEW ENGLAND NA REGIAO NORMAL *

RELATORIO DE EXECUCAO DA MARGEM DE POTENCIA REATIVA

Opcoes Ativadas: QLM VLIM CREM CTAP STEP NEWT TAPD

X-----X-----X-----X-----X								
Num.	Barra Nome	Are Tp		Tensao Geracao		Limite de Reativo		
				pu	Mvar	Tensao	Mvar	Lado
X-----X-----X-----X-----X	X-----X-----X-----X-----X	X-----X-----X-----X-----X	X-----X-----X-----X-----X	X-----X-----X-----X-----X	X-----X-----X-----X-----X	X-----X-----X-----X-----X	X-----X-----X-----X-----X	X-----X-----X-----X-----X
1		1	0	1.092	0.0	0.858	-254.0	DIR
2		1	0	1.048	0.0	0.886	-343.6	DIR
3		1	0	1.016	0.0	0.893	-423.9	DIR
4		1	0	0.991	0.0	0.857	-379.0	DIR
5		1	0	1.000	0.0	0.845	-331.2	DIR
6		1	0	1.003	0.0	0.848	-331.0	DIR
7		1	0	0.994	0.0	0.817	-302.0	DIR
8		1	0	0.994	0.0	0.816	-295.6	DIR
9		1	0	1.064	0.0	0.835	-237.3	DIR
10		1	0	1.009	0.0	0.856	-363.1	DIR
11		1	0	1.006	0.0	0.850	-350.4	DIR
12		1	0	0.983	0.0	0.799	-282.3	DIR
13		1	0	1.003	0.0	0.855	-376.6	DIR
14		1	0	0.995	0.0	0.872	-432.6	DIR
15		1	0	0.987	0.0	0.919	-756.0	DIR
16		1	1	1.000	227.9	0.983	189.1	DIR
17		1	0	1.006	0.0	0.939	-670.4	DIR
18		1	0	1.008	0.0	0.909	-557.2	DIR
19		1	0	1.035	0.0	0.879	-686.3	DIR
20		1	0	0.982	0.0	0.800	-476.3	DIR
21		1	0	1.009	0.0	0.902	-700.0	DIR
22		1	0	1.037	0.0	0.882	-662.6	DIR
23		1	0	1.032	0.0	0.871	-637.1	DIR
24		1	0	1.009	0.0	0.948	-771.5	DIR
25		1	0	1.042	0.0	0.865	-307.2	DIR
26		1	0	1.024	0.0	0.856	-273.6	DIR
27		1	0	1.008	0.0	0.855	-394.2	DIR
28		1	0	1.020	0.0	0.800	-155.9	DIR
29		1	0	1.020	0.0	0.799	-141.0	DIR
30		1	1	1.058	211.3	0.835	-127.9	DIR
31		1	1	0.982	225.0	0.800	-7.9	DIR
32		1	1	0.983	244.5	0.800	-37.0	DIR
33		1	-1	0.991	162.9	0.800	-341.2	DIR
34		1	1	1.012	216.2	0.800	-140.6	DIR
35		1	1	1.049	299.0	0.808	-321.6	DIR
36		1	1	1.064	153.4	0.800	-295.2	DIR
37		1	-1	1.017	20.0	0.800	-236.1	DIR
38		1	-1	0.999	34.5	0.800	-84.9	DIR
39		1	-2	1.106	131.1	1.106	131.1	DIR

Decidida a barra de interesse é criada uma barra fictícia, conectada à barra terminal por uma reatância síncrona, para simular a tensão interna do compensador síncrono em regime permanente.

A Tabela 5.2 apresenta o resultado da execução da margem de potência reativa já na região anormal de operação. Pode-se observar que a barra 16 está

no lado direito da curva na Tabela 5.1 e no lado esquerdo da curva na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultado de execução da margem de potência reativa na região anormal

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V09.01.06

* SISTEMA NEW ENGLAND BR 16 NA REGIAO ANORMAL *
RELATORIO DE EXECUCAO DA MARGEM DE POTENCIA REATIVA

Opcoes Ativadas: QLM VLIM CREM CTAP STEP NEWT TAPD

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
Num.	Barra Nome	Are	Tp	Tensao pu	Geracao Mvar	Limite de Tensao	Reativo Mvar	Lado
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
1		1	0	1.031	0.0	0.903	-80.9	DIR
2		1	0	0.988	0.0	0.895	-101.1	DIR
3		1	0	0.961	0.0	0.882	-128.6	DIR
4		1	0	0.945	0.0	0.856	-118.7	DIR
5		1	0	0.958	0.0	0.858	-104.0	DIR
6		1	0	0.963	0.0	0.862	-104.3	DIR
7		1	0	0.951	0.0	0.843	-95.7	DIR
8		1	0	0.950	0.0	0.841	-93.3	DIR
9		1	0	1.008	0.0	0.875	-76.9	DIR
10		1	0	0.971	0.0	0.873	-117.1	DIR
11		1	0	0.967	0.0	0.867	-112.2	DIR
12		1	0	0.943	0.0	0.816	-106.4	DIR
13		1	0	0.963	0.0	0.868	-122.0	DIR
14		1	0	0.952	0.0	0.869	-141.9	DIR
15		1	0	0.941	0.0	0.894	-388.6	DIR
16		1	1	0.955	309.6	0.983	189.5	ESQ
17		1	0	0.953	0.0	0.905	-267.7	DIR
18		1	0	0.954	0.0	0.890	-188.5	DIR
19		1	0	0.995	0.0	0.859	-573.1	DIR
20		1	0	0.948	0.0	0.799	-366.6	DIR
21		1	0	0.963	0.0	0.885	-590.4	DIR
22		1	0	0.992	0.0	0.870	-561.7	DIR
23		1	0	0.986	0.0	0.852	-539.4	DIR
24		1	0	0.963	0.0	0.924	-652.5	DIR
25		1	0	0.979	0.0	0.883	-91.0	DIR
26		1	0	0.954	0.0	0.860	-83.2	DIR
27		1	0	0.945	0.0	0.866	-120.2	DIR
28		1	0	0.937	0.0	0.808	-52.0	DIR
29		1	0	0.935	0.0	0.803	-47.5	DIR
30		1	-1	1.003	219.6	0.895	111.6	DIR
31		1	-1	0.967	310.7	0.845	196.8	DIR
32		1	-1	0.961	307.9	0.844	182.8	DIR
33		1	-1	0.954	162.9	0.799	-232.3	DIR
34		1	-1	0.986	249.8	0.800	-67.8	DIR
35		1	-1	1.008	313.9	0.799	-234.2	DIR
36		1	-1	1.019	153.2	0.800	-212.4	DIR
37		1	-1	0.954	20.0	0.835	-64.3	DIR
38		1	-1	0.915	34.5	0.800	-7.6	DIR
39		1	-2	1.046	131.1	1.046	131.1	DIR

5.2.1

Região Normal de Operação

Para a simulação na região normal, é utilizado o ponto de operação apresentado na Tabela 5.3. Observando-se a curva VQ da barra 16 na Figura 5.2 é possível confirmar que o ponto de operação se encontra na região normal.

Tabela 5.3 – Ponto de operação na região normal

Região Normal	
Eg (pu)	1,241 $\angle$ -34,6
V0 (pu)	1,000 $\angle$ -34,6
Carga ativa do sistema	6062 MW
Carga reativa do sistema	1657 Mvar
Xs (%)	10,57

A partir do ponto de operação na região normal da Tabela 5.3 para o sistema New England da Figura 5.1 são realizados alguns comandos para elevar/reduzir a tensão na barra 16, terminal, e é observado o sentido da variação da tensão interna do compensador síncrono (Eg).

Os resultados da simulação na região normal de operação são apresentados numericamente na Tabela 5.4 e graficamente na Figura 5.3.

Tabela 5.4 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação

Região Normal	
Módulo da tensão na barra terminal do CS 16 (Vt)	Módulo da tensão na barra interna do CS 16 (Eg)
0,990	1,198
0,995	1,208
0,997	1,217
1,000	1,241
1,003	1,268
1,005	1,285
1,010	1,330

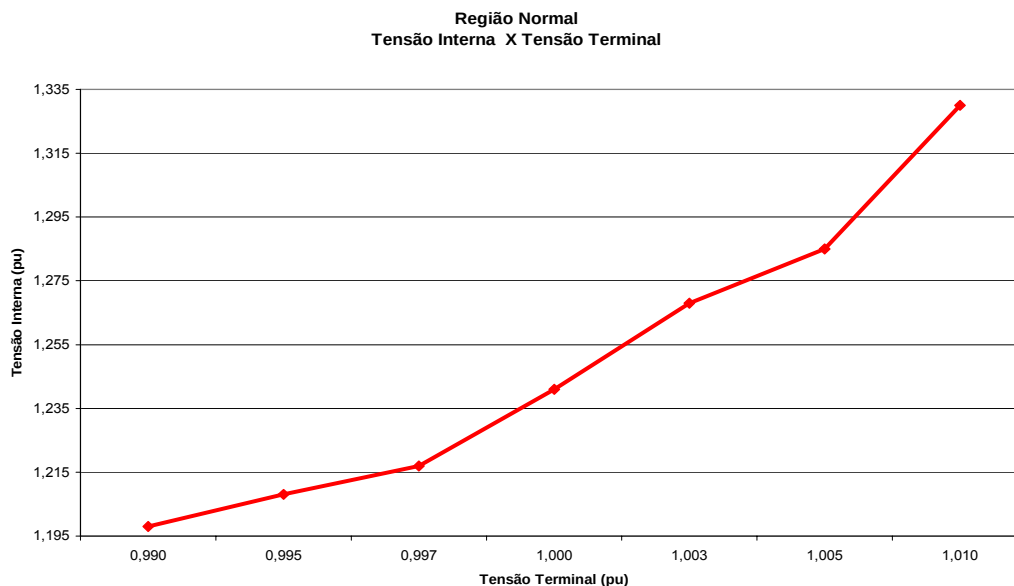


Figura 5.3 – Variação da tensão interna X tensão terminal na região normal de operação

Como pode ser observado, a simulação em regime permanente ocorre conforme o esperado para um ponto de operação na região normal: tensão interna e tensão terminal variando sempre no mesmo sentido. Para elevar a tensão terminal, a tensão interna precisa ser elevada e para reduzir a tensão terminal, a tensão interna precisa ser reduzida.

5.2.2

Região Anormal de Operação

A partir do ponto de operação na parte direita da curva VQ da Figura 5.2, considerado como sendo da região normal, é definido um ponto de operação na parte esquerda da mesma curva procurando manter a mesma potência reativa gerada. Este novo ponto de operação, considerado na região anormal, é apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Ponto de operação na região anormal

Região Anormal	
Eg (pu)	1,298 $\angle$ -37,5
V0 (pu)	0,955 $\angle$ -37,5
Carga ativa do sistema	6062 MW
Carga reativa do sistema	1657 Mvar
Xs (%)	10,57

Utilizando o ponto de operação na região anormal da Tabela 5.5 para o sistema New England da Figura 5.1 é realizada a mesma simulação: elevação/redução da tensão da barra 16 terminal e é observado o sentido da variação da tensão interna do compensador síncrono. Os resultados da simulação na região anormal de operação são apresentados numericamente na Tabela 5.6 e graficamente na Figura 5.4.

Tabela 5.6 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação

Região Anormal	
Módulo da tensão na barra terminal do CS 16 (Vt)	Módulo da tensão na barra interna do CS 16 (Eg)
0,945	1,461
0,950	1,370
0,953	1,325
0,955	1,298
0,958	1,259
0,960	1,236
0,965	1,207

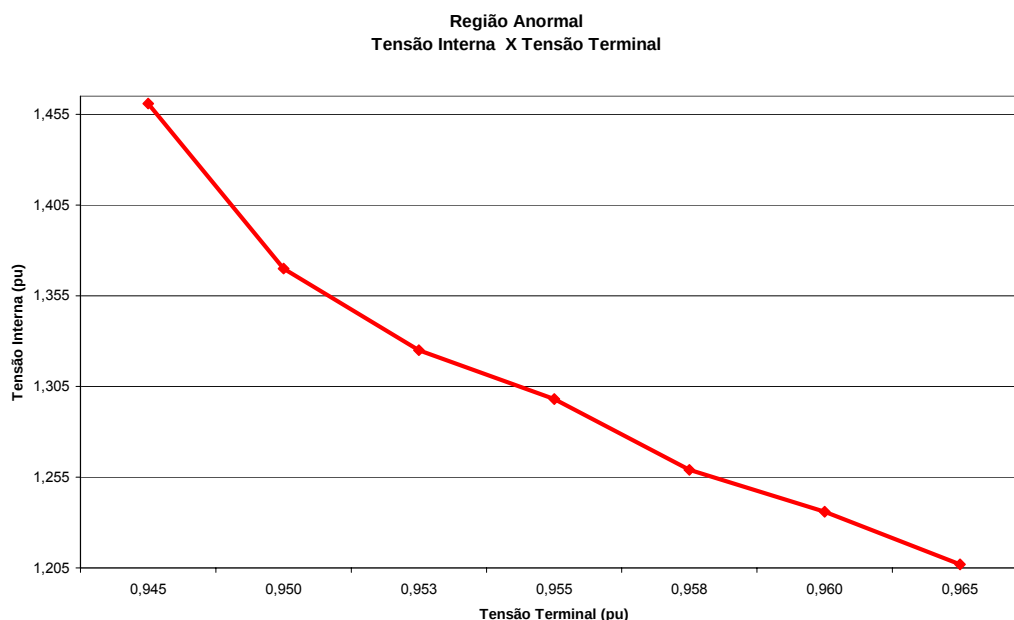


Figura 5.4 – Variação da tensão interna X tensão terminal na região anormal de operação

Como pode ser observado, a simulação em regime permanente ocorre conforme o esperado para um ponto de operação na região anormal: tensão interna e tensão terminal variando em sentidos opostos. Para elevar a tensão terminal, a tensão interna precisa ser reduzida e para reduzir a tensão terminal, a tensão interna precisa ser elevada. Isto mostra que o ponto de operação está realmente na região anormal, parte inferior da curva VQ, onde as manobras de controle de tensão podem ter o efeito oposto ao esperado e acabar levando o sistema ao colapso.

5.3

Análise no Domínio do Tempo

A análise no domínio do tempo tem objetivo de comprovar a relação existente entre as tensões interna e terminal do compensador síncrono em análise, obtidas nas simulações em regime permanente.

As simulações no domínio do tempo são realizadas utilizando os casos convergidos da região normal e anormal da análise de regime permanente, mostrados na Tabela 5.3 e na Tabela 5.5, respectivamente.

Para esta simulação, a barra fictícia criada para simular a tensão interna do compensador síncrono não é necessária.

5.3.1

Região Normal de Operação

Utilizando o ponto de operação na região normal da Tabela 5.3 para o sistema New England é realizado um comando para elevar a tensão na barra 16 em 0,03pu e observado o sentido da variação da tensão interna do compensador síncrono colocado nesta barra. Os resultados da simulação na região normal de operação são apresentados numericamente na Tabela 5.7 e graficamente na Figura 5.5.

Tabela 5.7 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação – domínio do tempo

Região Normal	
Módulo da tensão na barra terminal do CS 16 (Vt)	Módulo da tensão na barra interna do CS 16 (Eg)
1,000	1,245
1,003	1,281

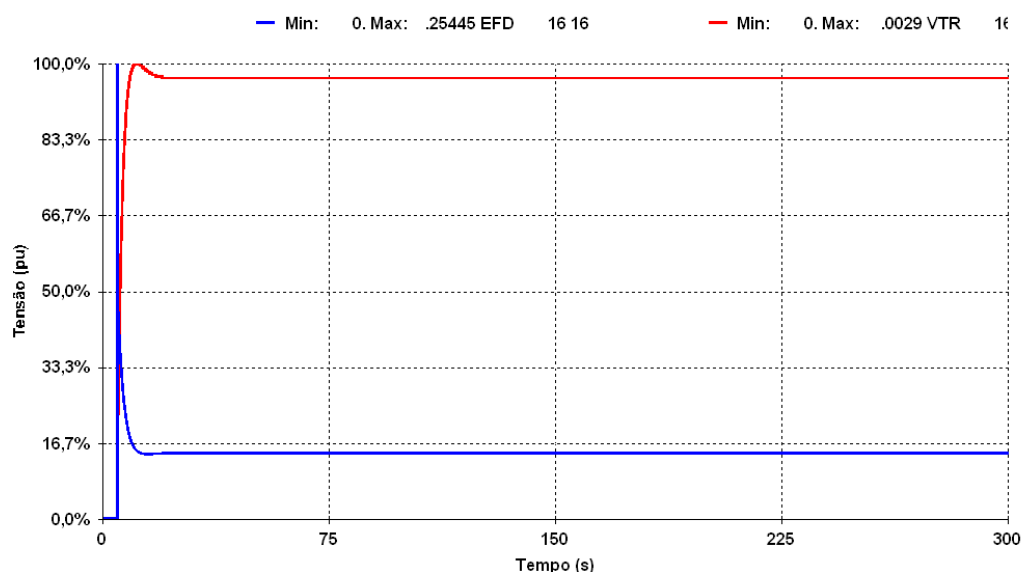


Figura 5.5 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação no domínio do tempo

Como pode ser observado, a simulação no domínio do tempo comprova o que ocorre na análise de regime permanente e o resultado é o esperado para um ponto de operação na região normal: tensão interna e tensão terminal variando no mesmo sentido.

5.3.2

Região Anormal de Operação

Utilizando agora o ponto de operação na região anormal da Tabela 5.5 para o sistema New England é realizado um comando para elevar a tensão da barra 16 em 0,03pu e observado o sentido da variação da tensão interna do compensador síncrono. Os resultados da simulação na região anormal de

operação podem ser observados numericamente na Tabela 5.8 e graficamente na Figura 5.6.

Tabela 5.8 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação – domínio do tempo

Região Anormal	
Módulo da tensão na barra terminal do CS 16 (Vt)	Módulo da tensão na barra interna do CS 16 (Eg)
0,955	1,303
0,958	1,340

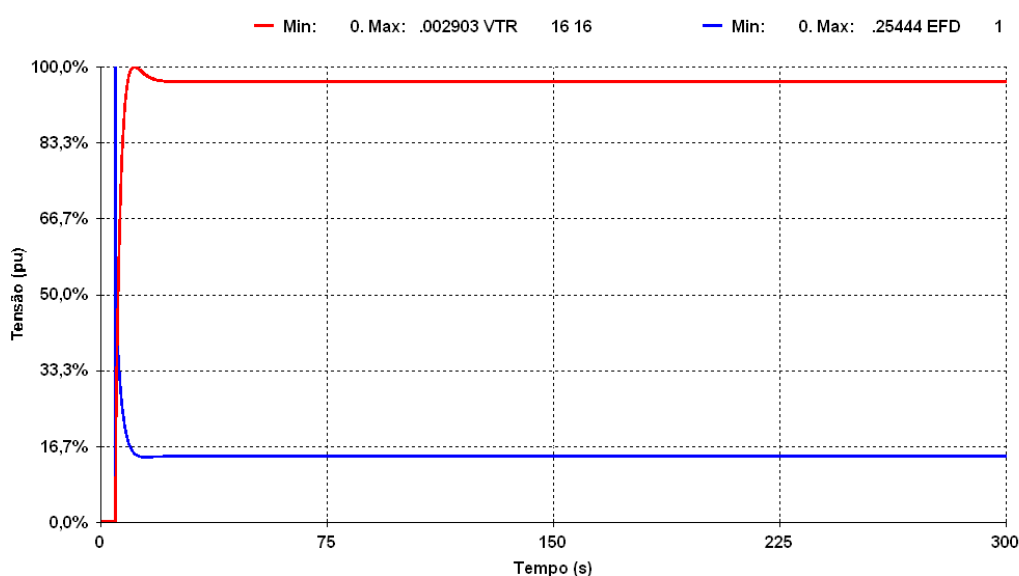


Figura 5.6 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação no domínio do tempo

Como pode ser observado, a simulação no domínio do tempo ocorre como se fosse um caso na região normal de operação, a tensão interna e tensão terminal variam no mesmo sentido. Esse resultado contraria o resultado da simulação, com o mesmo ponto de operação, em regime permanente, onde a tensão interna e a tensão terminal variam em sentidos opostos. Nesta simulação no domínio do tempo, a tensão terminal desejada foi obtida, mas a tensão interna variou no sentido usual, ao invés de contrário. A simulação estabilizou em um ponto de operação diferente daquele da simulação estática.

A Figura 5.7 mostra a potência reativa gerada pelo compensador síncrono. Para um ponto de operação no lado esquerdo da curva VQ da Figura 5.2, o esperado é que o sentido da variação da potência reativa seja oposto ao sentido da variação da tensão. Para elevar a tensão, a potência reativa gerada deve reduzir e vice-versa.

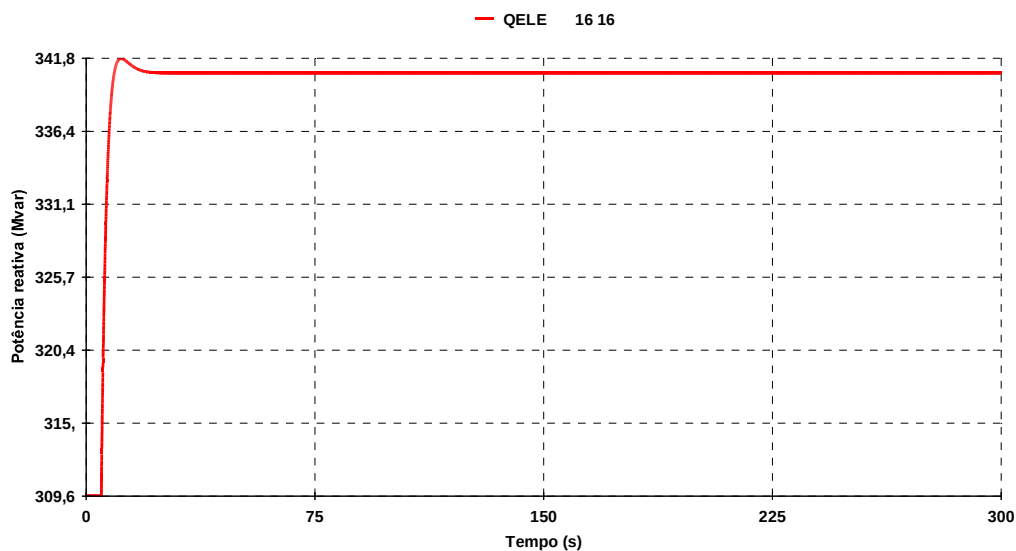


Figura 5.7 – Potência reativa gerada pelo compensador síncrono

Como pode ser observado, a potência reativa gerada pelo compensador síncrono aumentou para elevar a tensão terminal. Isso também contraria a simulação em regime permanente e a curva VQ da barra 16 apresentada na Figura 5.2.

Esse resultado contraria também os resultados associados ao controle de tensão por gerador apresentados na Seção 4.3.2.

5.3.3

Aumento da Carga do Sistema

Na elevação da carga do sistema é esperado que o perfil de tensão caia. Para que a tensão permaneça em níveis aceitáveis são necessárias manobras de controle de tensão ou atuação dos reguladores de tensão das máquinas do sistema. No sistema em análise, o compensador síncrono da barra 16 funciona para manter estável a tensão da barra.

Produzindo um aumento de carga no sistema é observado o sentido das variações da tensão da barra 16 e da tensão interna do compensador síncrono.

Na Figura 5.8 apresenta-se a elevação da carga ativa do sistema, enquanto que na Figura 5.9 apresenta-se a elevação de carga reativa do sistema. A carga do sistema foi elevada em 1% em dez degraus. Tanto a carga ativa quanto a carga reativa foram elevadas com este percentual.

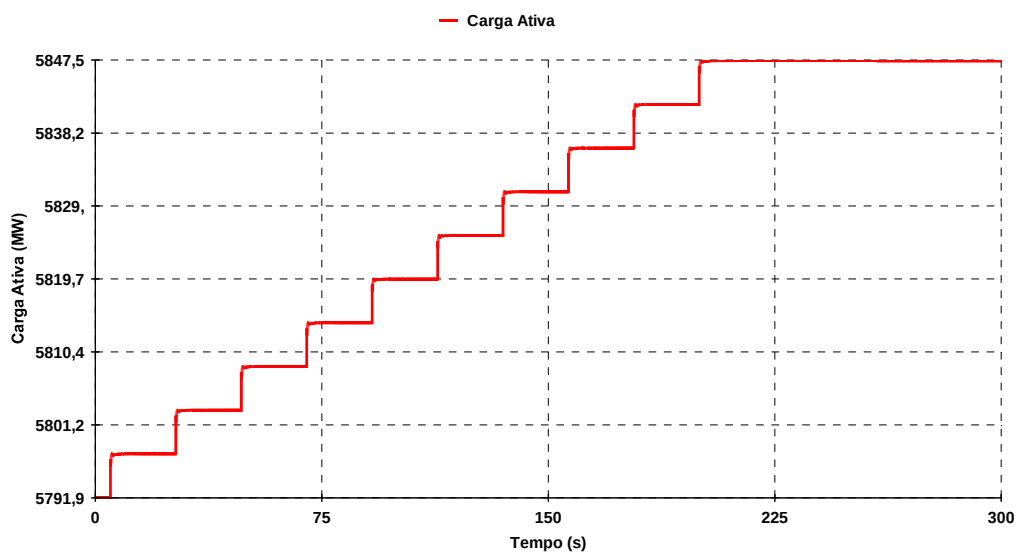


Figura 5.8 – Acréscimo da carga ativa no sistema

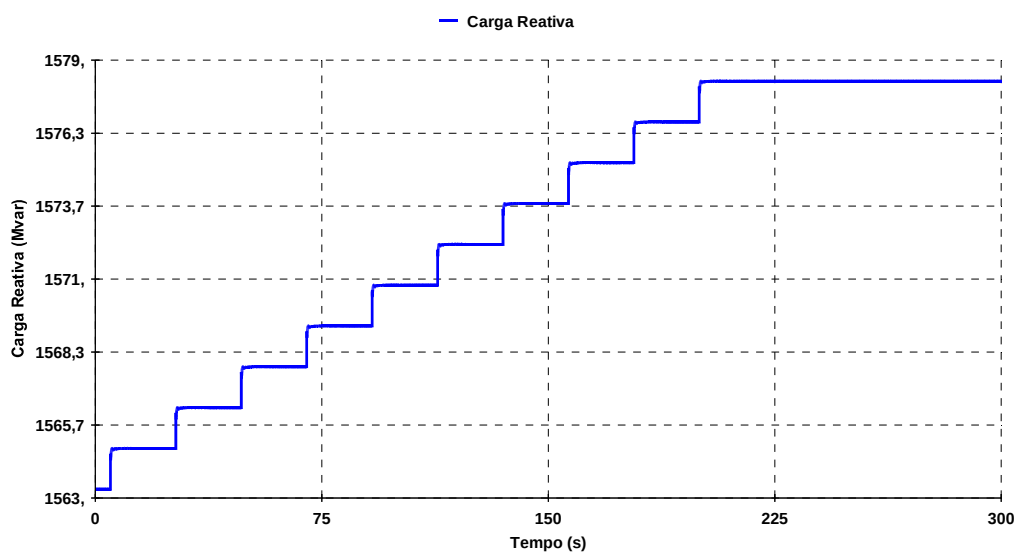


Figura 5.9 – Acréscimo da carga reativa no sistema

Numericamente na Tabela 5.9 e graficamente na Figura 5.10 mostra-se o que ocorre com a tensão terminal e com a tensão interna do compensador síncrono durante o acréscimo de carga no sistema.

Tabela 5.9 – Variação da tensão interna e da tensão terminal em decorrência da elevação de carga do sistema

Aumento de carga	
Módulo da tensão na barra terminal do CS 16 (Vt)	Módulo da tensão na barra interna do CS 16 (Eg)
0,955	1,303
0,955	1,305
0,955	1,307
0,955	1,309
0,954	1,311
0,954	1,313
0,954	1,315
0,954	1,317
0,954	1,319
0,954	1,321
0,954	1,323

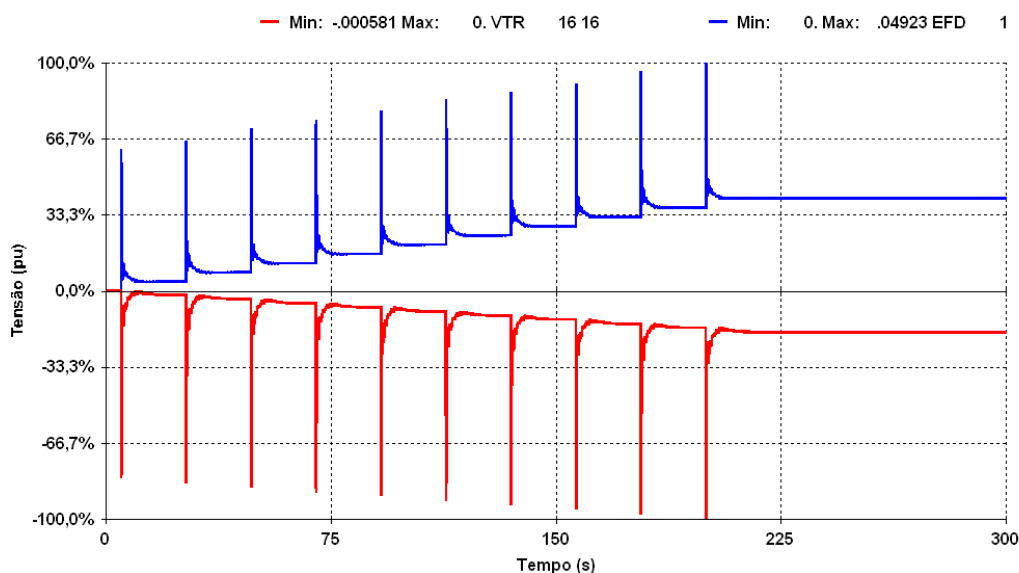


Figura 5.10 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal em decorrência do acréscimo de carga no sistema

Separando os gráficos da tensão interna na Figura 5.11 e da tensão terminal na Figura 5.12 é possível observar com detalhes o que ocorre com cada uma delas.

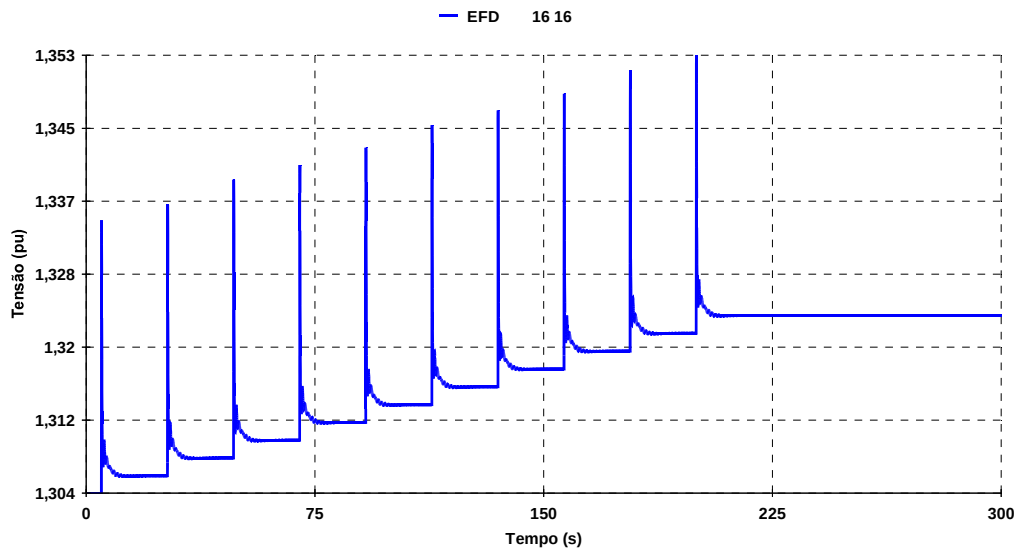


Figura 5.11 – Variação da tensão interna em decorrência do acréscimo de carga no sistema

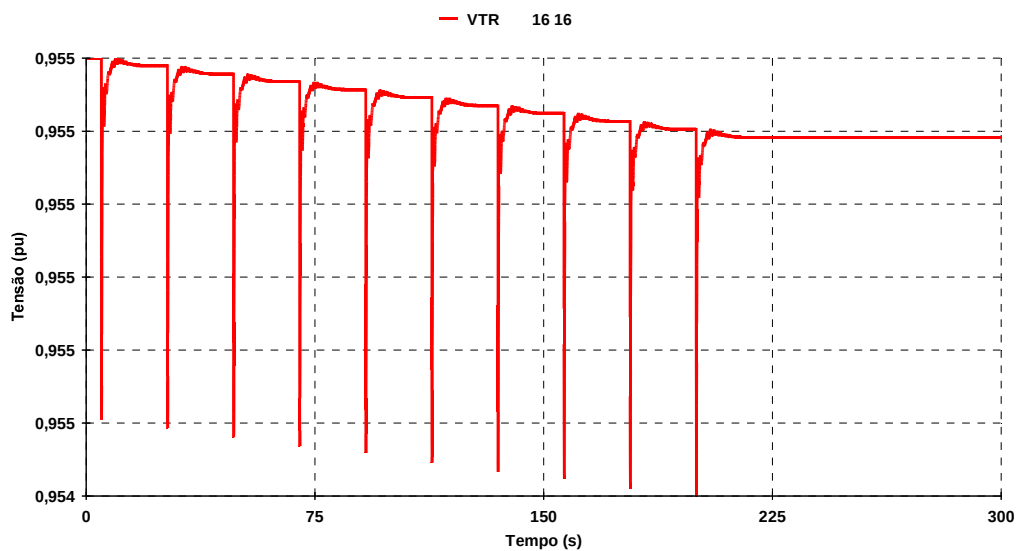


Figura 5.12 – Variação da tensão terminal em decorrência do acréscimo de carga no sistema

O acréscimo de carga no sistema faz com que o perfil de tensão caia. As barras de tensão controlada, incluindo a barra do compensador síncrono, procuram corrigir esse desvio da tensão inicial elevando novamente a tensão.

Analisando o que ocorre na barra de tensão controlada 16, do compensador síncrono em análise, constata-se que a tensão terminal é reduzida

pelo acréscimo de carga e em seguida elevada pelo regulador de tensão do compensador síncrono. Essa elevação de tensão provoca mais uma elevação da carga. No novo ponto de equilíbrio, é possível observar que a tensão terminal sofreu uma leve redução (desprezível) e a tensão interna uma elevação. Apesar de uma aparente oposição nos sentidos das tensões interna e terminal, a barra terminal permanece no valor desejado e a tensão interna aumenta para lidar com o aumento de carga. O sistema continua operando na região normal.

5.3.4

Variação de Tensão em Outra Barra do Sistema

Manobras de tensão em outro ponto do sistema tendem a variar também a tensão da barra 16 em análise onde está conectado o compensador síncrono.

A simulação em questão é a movimentação de tensão em outra barra do sistema e observação dos sentidos das variações da tensão da barra 16 e da tensão interna do compensador síncrono desta barra.

A elevação da tensão na barra 39 em 0,05pu é apresentada na Figura 5.13.

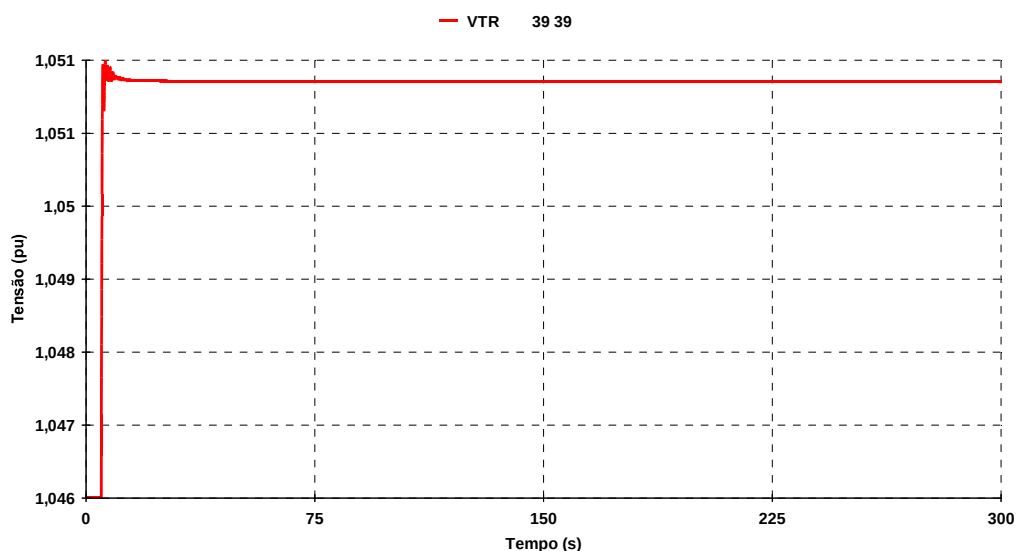


Figura 5.13 – Variação da tensão na barra 39

Gráfico de Tensão (pu) versus Tempo (s) para o VTR 16 16. A tensão permanece constante em 0,955 pu até aproximadamente 5 segundos, onde ocorre uma transição brusca para 0,956 pu, mantendo-se nesse nível até 300 segundos.

É possível observar que, assim como na elevação de carga do sistema, esse tipo de manobra pode levar a crer que o sistema está operando na região anormal em virtude da oposição no sentido das variações da tensão interna e da tensão terminal. Porém, esta oposição é natural para tentar manter a tensão em seu valor inicial.

5.4

Conclusões

Das análises em regime permanente é possível concluir que pode-se ter pontos de operação na região normal, onde as manobras de controle de tensão têm o efeito esperado, e pontos de operação na região anormal, onde as manobras de controle de tensão têm efeito oposto ao esperado.

Das análises iniciais no domínio do tempo conclui-se que não foi possível verificar os fenômenos de estabilidade de tensão na região anormal de operação. Apenas o resultado do ponto de operação na região normal coincide com o resultado da simulação em regime permanente. O ponto de operação da região anormal em regime permanente se comportou, no domínio do tempo, da mesma maneira que o ponto de operação na região normal, com as tensões interna e terminal variando sempre no mesmo sentido. É interessante notar, porém, que embora as tensões internas tenham variado em sentidos opostos nas simulações estática e dinâmica, ambos os algoritmos encontram soluções estáveis e diferentes, o que não é esperado.

Da simulação da atuação do controle de tensão ante a elevação de carga do sistema é possível concluir que apesar da aparente oposição entre a tensão interna, subindo, e a tensão terminal, descendo, isto não significa que o sistema esteja operando na região anormal, tratando-se apenas de uma correção da tensão para o valor pré-estabelecido.

Por último, é possível concluir que a atuação do regulador de tensão do compensador síncrono, em consequência da elevação de tensão no sistema, acontece da mesma maneira como na variação da carga: a tensão interna varia em sentido oposto ao da tensão terminal. Porém o ponto de operação não está na região anormal, sendo apenas uma correção da tensão para o valor pré-estabelecido.