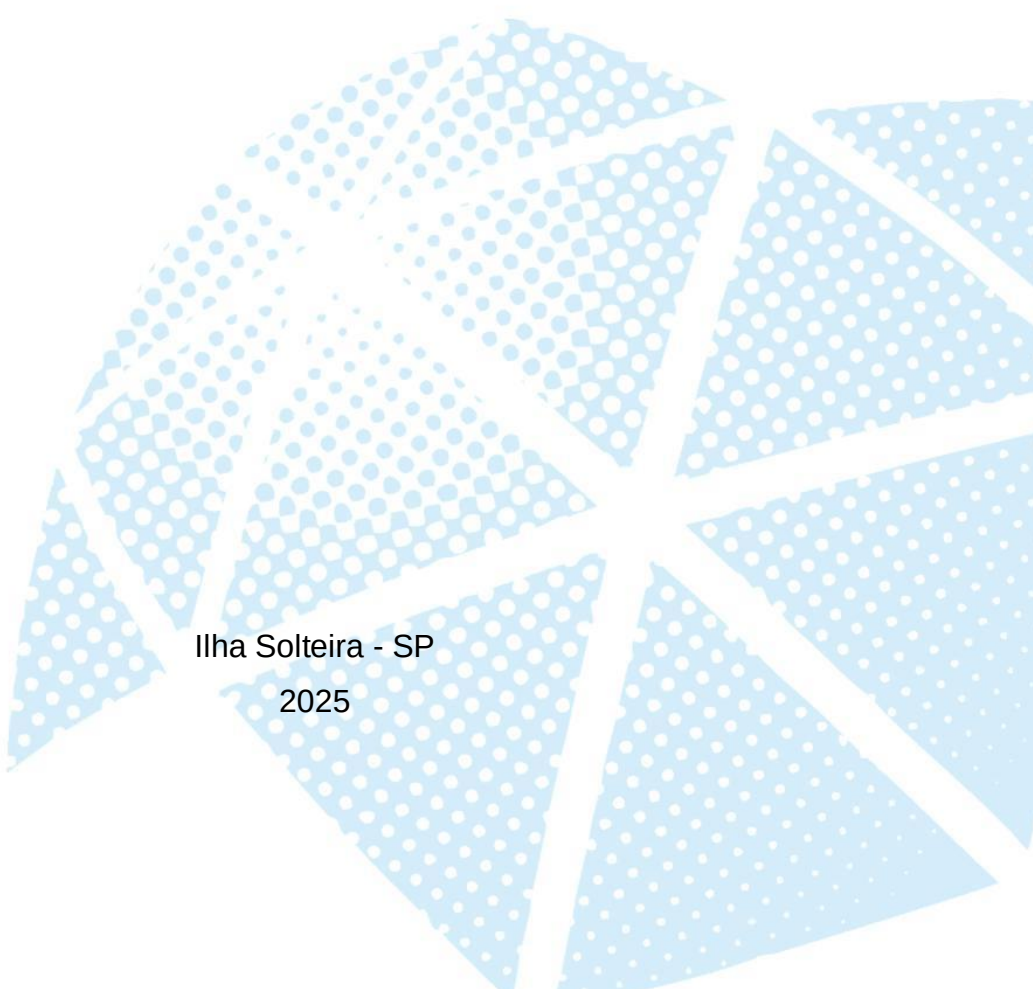


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

KEVIN KENZI NAGANO

Projeto e Simulação de um Compensador Estático de Reativos (SVC)

Ilha Solteira - SP
2025



KEVIN KENZI NAGANO

Projeto e Simulação de um Compensador Estático de Reativos (SVC)

Trabalho de Graduação apresentado
à Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira, Ilha Solteira, para obtenção
do título de Grau acadêmico Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Fábio
Bertequini Leão

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

N147p Nagano, Kevin Kenzi.
Projeto e simulação de um compensador estático de reativos (SVC) / Kevin Kenzi Nagano. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
109 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025

Orientador: Fábio Bertequini Leão

Inclui bibliografia

1. Compensador estático e reativos (SVC). 2. Facts. 3. TCR. 4. TSC. 5.
MATLAB/Simulink. 6. Estabilidade de tensão.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O Compensador Estático de Reativos (SVC) possui relevante impacto técnico e científico ao melhorar a qualidade da energia elétrica por meio da compensação dinâmica de reativos. Sua aplicação promove inovação no setor elétrico, com benefícios econômicos pela otimização de sistemas e redução de perdas. Do ponto de vista social e educacional, contribui para a formação de profissionais em tecnologias avançadas. Culturalmente, fortalece a pesquisa nacional com potencial de internacionalização. Inserido nos contextos local, regional e nacional, o SVC apoia o desenvolvimento sustentável ao garantir maior eficiência energética e estabilidade nos sistemas de potência.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The Static Var Compensator (SVC) has significant technical and scientific impact by improving power quality through dynamic reactive power compensation. Its application fosters innovation in the electrical sector, offering economic benefits by optimizing systems and reducing losses. Socially and educationally, it contributes to the development of skilled professionals in advanced technologies. Culturally, it strengthens national research with potential for international collaboration. Locally, regionally, and nationally, the SVC supports sustainable development by ensuring greater energy efficiency and stability in power systems.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos onze dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente Kevin Kenzi Nagano, matriculado sob o nº 181053021, tendo como banca examinadora seu orientador, o *Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão*, a *Doutoranda Elis Caroline de Souza Trindade* e o *mestrando Leonardo Audalio Ferreira Nascimento*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado “**Projeto e Simulação de um Compensador Estático de Reativos (SVC)**” obtendo a nota 9,0 (NOVE) e conceito Aprovado.

Fábio Bertequini Leão

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão

- orientador -

Kevin Kenzi Nagano

Kevin Kenzi Nagano

- discente -



Documento assinado digitalmente
ELIS CAROLINE DE SOUZA TRINDADE
Data: 11/11/2025 17:16:01-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>



Documento assinado digitalmente
LEONARDO AUDALIO FERREIRA NASCIMENTO
Data: 12/11/2025 16:23:06-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Elis Caroline de Souza Trindade

- Membro da Banca -

Leonardo Audalio Ferreira Nascimento

- Membro da Banca -

Dedico este trabalho à ...

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente minha mãe, que é razão de não somente esta, mas todas as conquistas possíveis. Pelo apoio e amor incondicional que me proporcionaram nessa jornada, fazendo com que pudesse contornar as diversas dificuldades.

Ao meu excelente orientador, Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão, que, de fato, é a personificação de um professor, e o melhor em todos os quesitos. Pela paciência, dedicação, preocupação e todo o conhecimento e experiência repassados. Além do entusiasmo, calma e serenidade que me motivaram nos momentos mais difíceis.

Aos amigos e colegas que estiveram ao meu lado durante esse período.

Ao Rafael Figueiredo, pelo acolhimento durante meu período de estágio, pelas experiências e conhecimentos proporcionados. Sempre à disposição para me ajudar com as dificuldades que surgiram. Por sua amizade e exemplo de profissionalismo.

“As universidades serão o que são suas bibliotecas” (Gelfand, 1968, p. 19, tradução nossa).

RESUMO

O presente Trabalho de Graduação (TG) aborda a crescente complexidade dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) e as limitações de estabilidade de tensão e limites térmicos decorrentes do aumento da demanda energética e da interligação das redes. Nesse contexto, o estudo se concentrou na aplicação dos Dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), notadamente o Compensador Estático de Reativos (SVC) (*Static VAr Compensator*), reconhecido como um dos controladores paralelos mais cruciais para o suporte dinâmico de potência reativa e o controle preciso de tensão por VAR. Além do controle da tensão no sistema, o SVC aumenta a capacidade de transferência de potência ao lidar também com a estabilidade angular e dinâmica do sistema. O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo de caso sobre a inserção de um SVC para compensação de VAR em sistemas de potência. A metodologia envolveu a modelagem e simulação detalhada do SVC no ambiente MATLAB/Simulink, integrando a arquitetura de controle em malha fechada, composta pelo Regulador de Tensão, Unidade de Distribuição, e Unidade de Disparo. O modelo do SVC combina o Reator Controlado a Tiristor (TCR), para absorção indutiva contínua (controlado pelo ângulo de disparo), e Capacitores Chaveados a Tiristor (TSCs), para injeção capacitiva discreta. As simulações, realizadas em um sistema de 440kV, testaram a resposta do SVC diante de diversos cenários de subtensão, sobretensão e transitórios entre a queda e elevação da tensão. Os resultados demonstraram a eficácia e rapidez do dispositivo. Em cenários de queda de tensão (subtensão), o SVC acionou rapidamente os TSCs para injetar potência reativa capacitiva (susceptância positiva), recuperando o nível de tensão. Em casos de sobretensão, o TCR foi acionado (ângulo de disparo próximo a 90°), absorvendo potência reativa indutiva (susceptância negativa) para reduzir a tensão do barramento. Observou-se que, durante as transições entre regimes de subtensão e sobretensão, o SVC demonstrou capacidade de mudar rapidamente de injeção máxima para absorção máxima, mantendo a estabilidade do sistema frente a picos transitórios. Concluiu-se que o SVC, através de sua modelagem no Simulink, validou-se como uma solução robusta e dinâmica para o controle da potência reativa e a estabilidade da tensão em sistemas de potência.

Palavras-chave: Compensador Estático de Reativos (SVC); FACTS; TCR; TSC; MATLAB/Simulink; Estabilidade de Tensão.

ABSTRACT

This Final Project addressed the growing complexity of Electric Power Systems and the voltage stability limitations arising from increased energy demand and grid interconnection. The study focused on the application of FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) devices, particularly the Static Var Compensator (SVC), recognized as one of the most crucial shunt controllers for dynamic reactive power support and precise voltage control by VAr. In addition to controlling the voltage in the system, the SVC increases the power transfer capacity by also addressing the angular and dynamic stability of the system. The general objective of this work was to conduct a case study regarding the insertion of an SVC for VAr compensation in power systems. The methodology involved the detailed modeling and simulation of the SVC in the MATLAB/Simulink environment, integrating the closed-loop control architecture, which includes the Voltage Regulator, Distribution Unit, and Firing Unit. The SVC model is based on the combination of a Thyristor-Controlled Reactor (TCR) for continuous inductive absorption (controlled by the firing angle α) and Thyristor-Switched Capacitors (TSCs) for discrete capacitive injection. Simulations were performed on a 440kV system, testing the SVC's response to various scenarios of undervoltage, overvoltage and transients between voltage drop and rise. The results demonstrated the effectiveness and speed of the device. In scenarios of undervoltage (voltage drop), the SVC rapidly activated the TSCs to inject capacitive reactive power (positive susceptance), successfully restoring the voltage level. In cases of overvoltage, the TCR was activated (with the angle α shifting toward 90°), absorbing inductive reactive power (negative susceptance) to reduce the bus voltage. This absorption was characterized by the current lagging the voltage. Furthermore, during complex transitions between undervoltage and overvoltage regimes, the SVC demonstrated the ability to rapidly switch from maximum injection to maximum absorption, maintaining system stability despite small transient peaks. It was concluded that the SVC, validated through detailed Simulink modeling, is a robust and dynamic solution for controlling reactive power and achieving rapid and precise voltage stability in power systems.

Keywords: Static Var Compensator (SVC); FACTS; TCR; TSC; MATLAB/Simulink; Voltage Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Forma de onda da tensão e corrente de um capacitor (b) Forma de onda da tensão e corrente de um indutor.....	20
Figura 2 - Curva característica V-I de um SVC e STATCOM.....	23
Figura 3 – Diagrama de blocos da função de transferência básica do compensador estático (var).....	24
Figura 4 - Controle de Fluxo de Potência.....	27
Figura 5 - Fluxo de potência em sistema malhado.....	28
Figura 6 - Tipos de dispositivos FACTS.....	31
Figura 7 - SSSC.....	33
Figura 8 - TCSC.....	34
Figura 9 -TCSR.....	35
Figura 10 - STATCOM.....	36
Figura 11 - SVC.....	37
Figura 12 -TCR.....	38
Figura 13 - TSC.....	39
Figura 14 - UPFC.....	40
Figura 15 - TCPST.....	41
Figura 16 - Topologia de um SVC.....	45
Figura 17 - Forma de onda no (a) indutor e no (b) TCR.....	45
Figura 18 - Diagrama do SVC no Simulink.....	50
Figura 19 - Diagrama de controle do SVC.....	51
Figura 20 - Sistema de medição.....	53
Figura 21 - Diagrama do regulador de tensão.....	55
Figura 22 - Diagrama da unidade de distribuição.....	57
Figura 23 - Unidade de disparo.....	59
Figura 24 - Sub-bloco da unidade de disparo.....	61
Figura 25 - Gerador de Pulso do TCR.....	63
Figura 26 - Gerador de Pulso para o TSC.....	65
Figura 27- Diagrama do Phase-Locked Loop.....	67
Figura 28 - Controlador P-I.....	69
Figura 29 - Dados para o caso 1.....	71

Figura 30 - Simulação da tensão medida, susceptância, ângulo de disparo e número de TSCs	72
Figura 31 - Simulação da tensão e corrente na entrada, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo e número de TSCs	74
Figura 32 - Simulação no TCR na queda de tensão	76
Figura 33 - Simulação no TSC na queda de tensão.....	77
Figura 34 - Dados para o caso 2	78
Figura 35 - Simulação da tensão medida, susceptância, ângulo de disparo e número de TSCs para queda de tensão acentuada.....	79
Figura 36 - Simulação da tensão e corrente na entrada, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo e número de TSCs para queda de tensão acentuada....	80
Figura 37 - Simulação no TCR para queda de tensão acentuada.....	81
Figura 38 - Simulação no TSC para queda de tensão acentuada.....	82
Figura 39 - Dados para o Caso 3	83
Figura 40 - Simulação da tensão medida, susceptância, ângulo de disparo e TSCs acionados para sobretensão	84
Figura 41- Simulação da tensão e corrente na fase A, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo e TCRs acionados na sobretensão	85
Figura 42 - Simulação do TCR na sobretensão	86
Figura 43 - Simulação do TSC para a sobretensão	88
Figura 44 - Dados para o caso 4	89
Figura 45 - Simulação da tensão medida, susceptância, ângulo de disparo e TSCs acionados para uma sobretensão mais acentuada	90
Figura 46 - Simulação da tensão e corrente na fase A, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo e TSCs acionados na sobretensão acentuada	91
Figura 47 - Simulação no TCR na sobretensão acentuada.....	93
Figura 48 - Simulação no TSC na sobretensão acentuada.....	94
Figura 49 - Dados para o caso 5	95
Figura 50 - Simulação da tensão medida, susceptância, ângulo de disparo e TSCs acionados na transição de subtensão para sobretensão	96
Figura 51 - Simulação da tensão e corrente da fase A, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo, TSCs acionados para a transição de subtensão para sobretensão	97
Figura 52 - Simulação no TCR da transição de sobtensão para sobretensão	99

Figura 53 - Simulação no TSC da transição de sobtensão para sobretensão.....	100
Figura 54 - Dados para o caso 6	101
Figura 55 - Simulação da tensão medida, Susceptância, ângulo de disparo e TSCs acionados da sobretensão para subtensão.....	102
Figura 56- Simulação da tensão e corrente na fase A, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo e acionamento dos TSCs na transição de sobretensão para subtensão.....	103
Figura 57 - Simulação do TCR na transição de sobretensão para subtensão	105
Figura 58 - Simulação do TSC na transição de sobretensão para subtensão.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FACTS	Flexible AC Transmission System
SVC	Static Var Compensator
CER	Compensador Estático de Reativos
SEP	Sistema Elétrico de Potência
HVDC	High Voltage Direct Current
AC	Alternate Current
DC	Direct Current
MW	MegaWatt
Hz	Hertz
TCR	Thyristor-Controlled Reactor
TSC	Thyristor-Switched Capacitor
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
IPFC	Interline Power Flow Controller
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TSSC	Thyristor-Switched Series Capacitor
TCSR	Thyristor-Controlled Series Reactor
TSSR	Thyristor-Switched Series Reactor
SVG	Static Var Generator
SVS	Static Var System
TCBR	Thyristor Controlled Braking Resistor
UPFC	Unified Power Flow Controller
TCPS	Thyristor-Controlled Phase Shifting
IPC	Interphase Power Controller
TCVL	Thyristor-Controlled Voltage Limiter
TCVR	Thyristor-Controlled Voltage Regulator
PAR	Phase Angle Regulator
Ns/C	Número de amostrar por ciclo

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Ohm
α	Ângulo de disparo do tiristor
L	Indutor
ω	Frequência
d/dt	Derivada em relação ao tempo
I	Corrente fasorial
f	Frequência da rede
B	Susceptância
Z	Impedância
C	Capacitor
Q	Potência reativa
VAR	Volt-Ampère reativo
QL	Reativo indutivo
QC	Reativo capacitivo
XL	Reatância indutiva
XC	Reatância capacitiva
V	Tensão fasorial
u	Tensão elétrica
Δ	Variação entre grandezas
Kp	Ganho proporcional
Ki	Ganho integral
Ts	Tempo de amostragem
z	Transformada Z
pu	Sistema por unidade
G_1	Ganho do circuito de medição e processamento de tensão
G_2	Ganho do conversor de corrente de reativos para o sinal de controle
T_d	Atraso de condução/Transport lag
X	Função de transferência do sistema de potência
H	Função de transferência do regulador de tensão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	JUSTIFICATIVA	17
1.4	ESTRUTURA.....	21
2	SISTEMAS FLEXÍVEIS DE TRANSMISSÃO – FACTS.....	23
2.1	INTRODUÇÃO	23
2.2	ELETRÔNICA DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE CORRENTE ALTERNADA.....	26
2.3	FLUXO DE POTÊNCIA NO SISTEMA ELÉTRICO	26
2.4	TIPOS DE DISPOSITIVOS FACTS.....	30
2.5	CONTROLADORES SÉRIE	32
2.5.1	SSSC.....	32
2.5.2	IPFC	33
2.5.3	TCSC.....	33
2.5.4	TSSC.....	34
2.5.5	TCSR.....	34
2.5.6	TSSR.....	35
2.6	CONTROLADORES EM PARALELO.....	35
2.6.1	STATCOM.....	35
2.6.2	SSG	36
2.6.3	SVC	37
2.6.4	TCR.....	37
2.6.5	TSR	38
2.6.6	TSC	38
2.6.7	SVG.....	39
2.6.8	SVS	39
2.6.9	TCBR	39
2.7	CONTROLADORES COMBINADOS SÉRIE-PARALELO.....	40
2.7.1	UPFC.....	40
2.7.2	TCPST.....	41
2.7.3	IPC	42

2.8	OUTROS TIPOS DE CONTROLADORES.....	42
2.8.1	TCVL	42
2.8.2	TCVR.....	42
3	MODELAGEM	43
3.1	COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS - SVC.....	43
3.1.1	Funcionamento do SVC	43
3.1.2	Reator Controlado a Tiristor -TCR	44
3.1.3	Capacitor Chaveado a Tiristor -TSC	47
3.2	IMPLEMENTAÇÃO DOS COMPONENTES NO MATLAB	48
3.2.1	Dimensionamento do TCR.....	49
3.2.2	Dimensionamento do TSC.....	49
3.2.3	Modelagem do SVC	50
4.	RESULTADOS.....	71
4.1	CASO 1	71
4.2	CASO 2	78
4.3	CASO 3	83
4.4	CASO 4	89
4.5	CASO 5	95
4.6	CASO 6	101
5.	CONCLUSÃO	107
	REFERÊNCIAS	109

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A partir do século passado, com o desenvolvimento tecnológico e o crescimento de centros urbanos, várias mudanças ocorreram em larga escala na sociedade. que aumentou a complexidade da operação dos sistemas de energia elétrica aumentado a importância de seu estudo. Além disso, pode-se citar limitações originadas pelo uso indevido de recursos naturais e as questões ambientais e sociais.

Com o crescimento rápido e, às vezes, desordenado dos sistemas elétricos de potência, ficou cada vez mais claro que suas limitações físicas começaram a aparecer com mais força. Esse crescimento trouxe um aumento na ocorrência de problemas importantes, especialmente relacionados à estabilidade da tensão. Por isso, tem sido feito um grande esforço para entender melhor as questões envolvendo a potência reativa e o controle de tensão nesses sistemas.

O desenvolvimento de dispositivos e técnicas para mitigar problemas de estabilidade e controle em redes elétricas se tornou uma prioridade global. Em resposta a essa demanda por maior flexibilidade, segurança, robustez e capacidade de transferência de energia, surgiram os Dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*). A aplicação bem-sucedida dos FACTS, como o SVC, está intrinsecamente ligada ao avanço da Eletrônica de Potência e de metodologias de Controle aplicadas para gerenciar dinamicamente o fluxo de potência e a tensão na rede.

Inserido no contexto da tecnologia FACTS, um dos dispositivos paralelos mais cruciais para o suporte de potência reativa e, conseqüentemente, para a estabilidade de tensão, é o Compensador Estático de Reativos ou CER (SVC - *Static VAR Compensator*). Sua topologia é baseada na combinação de reatores e capacitores em paralelo controlados por chaveamento de tiristores, permitindo o ajuste dinâmico da potência reativa absorvida ou injetada em seus terminais. Neste trabalho, o comportamento de um SVC é investigado através da modelagem de um sistema elétrico completo no ambiente Simulink. Serão realizadas simulações de subtensão, sobretensão e transitórios entre subtensão e sobretensão no sistema para analisar a eficácia do SVC no controle rápido e preciso da tensão em seu ponto de conexão.

1.2OBJETIVOS

O conceito de compensação de reativos abrange um campo de estudo vasto e diversificado, intrinsecamente ligado à qualidade da energia elétrica. Isso se deve ao fato de que diversos problemas de qualidade de energia podem ser atenuados ou solucionados por meio de um controle de reativos adequado. Tal controle é viabilizado pelo desenvolvimento e aplicação simultânea de equipamentos para sistemas elétricos de potência e de programas computacionais específicos para análises pertinentes. Assim, o objetivo geral deste trabalho é definido como:

- Realizar um estudo de caso referente ao sistema elétrico com a inserção de um Compensador Estático de Reativos, utilizado para compensação de tensão em sistemas de potência;

Partindo do objetivo principal, são divididos em objetivos específicos, para que se alcance este objetivo em questão, como:

- Estudo sobre dispositivos FACTS – Flexible AC Transmission Systems;
- Estudo sobre o SVC – Static VAR Compensator;
- Obter conhecimentos nas áreas de qualidade de energia, linhas de transmissão e equipamentos de alta tensão;
- Modelar e simular utilizando o MATLAB/Simulink, a fim de verificar a qualidade de energia e transitórios em sistemas de potência.

1.3JUSTIFICATIVA

O aumento da demanda por energia e a crescente integração de cargas não lineares e fontes renováveis intermitentes nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) têm imposto desafios significativos à qualidade de energia e à estabilidade de tensão. A compensação de reativos é fundamental para mitigar problemas como quedas de tensão, baixa regulação de tensão e perdas elevadas na rede de transmissão e distribuição.

A potência reativa representa a diferença de fase entre as ondas de corrente e tensão na mesma frequência. Quando um dispositivo necessita de potência reativa, este gera campos magnéticos, com indutores, ou campos elétricos, com capacitores, e a corrente é defasada em relação a tensão.

O crescimento da carga (condição de carga pesada) afeta criticamente a regulação primária do sistema elétrico (controle de tensão e frequência), afetando a estabilidade de tensão. Consequentemente, ocorre o aumento da demanda, principalmente de cargas indutivas, e o sistema se aproxima do risco de colapso de tensão. Compensadores shunt como o SVC e STATCOM são utilizados para fornecer suporte reativo e evitar essa instabilidade. No entanto, se a tensão for artificialmente suportada por compensação reativa sem geração de potência ativa suficiente, a frequência cairá continuamente, resultando em um colapso integrado do sistema (tensão e frequência) (HINGORANI et al., 2000).

O crescimento da carga exige que os compensadores operem em seu limite máximo, fornecendo o suporte capacitivo necessário. A operação é definida pelo declive de regulação (*regulation slope*), que permite que a tensão terminal seja ligeiramente menor no limite capacitivo máximo para estender o alcance operacional linear do SVC (HINGORANI et al., 2000).

Os dispositivos FACTS, como o SVC e o STATCOM, são de importância crucial para a capacidade das máquinas (geradores e turbinas), manifestando-se principalmente de duas maneiras: aumentando a capacidade de exportação de potência e protegendo os componentes mecânicos contra torques destrutivos. Os controladores FACTS superam as limitações impostas pela estabilidade da transmissão, permitindo que as máquinas operem mais perto de sua capacidade térmica (HINGORANI et al., 2000).

O aumento da capacidade de exportação de potência (Estabilidade Angular) é alcançado pelo controle rápido de tensão do SVC, que eleva os limites de estabilidade dinâmica e angular, permitindo que as máquinas mantenham o sincronismo e exportem mais potência. Na Estabilidade Transitória, o SVC aumenta a margem de segurança ao fornecer suporte de tensão eficaz após faltas. Além disso, o SVC atua no amortecimento de oscilações eletromecânicas (Estabilidade Dinâmica), suprimindo essas oscilações e removendo uma limitação que restringe a potência transmissível (HINGORANI et al., 2000).

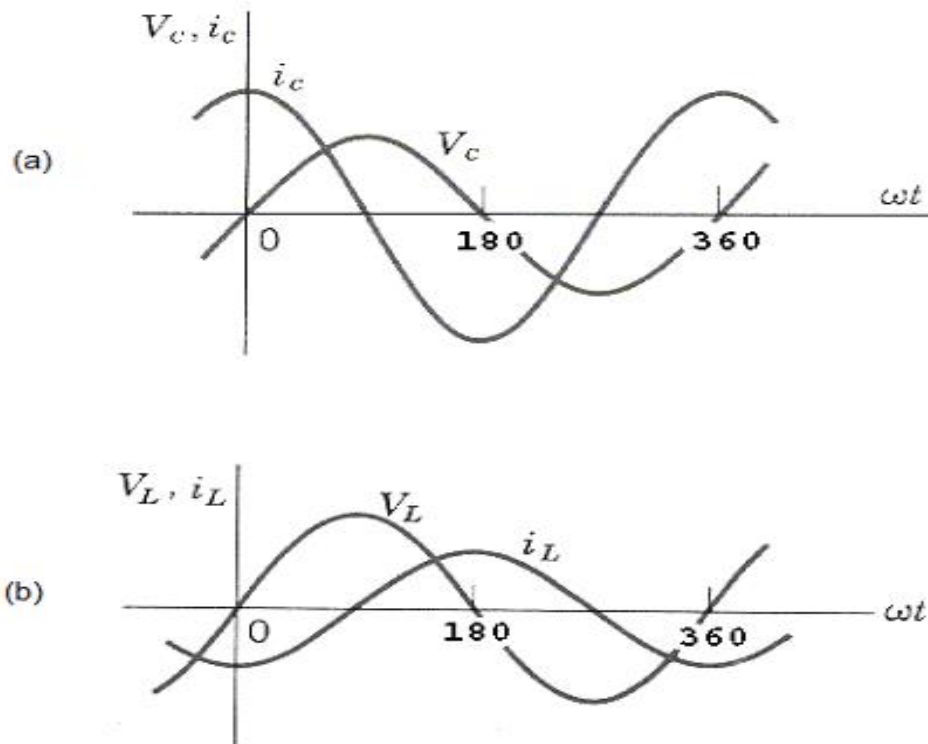
Em relação à Proteção e Mitigação de Danos Mecânicos, o foco está na prevenção da Ressonância Subsíncrona (SSR). A SSR é uma instabilidade grave onde a ressonância elétrica em frequências subsíncronas interage com as oscilações torcionais do eixo turbina-gerador, podendo levar à sua quebra. Contramedidas FACTS, como o TCSC, são projetadas para serem neutras à SSR ou para mitigá-la ativamente, amortecendo e desajustando as frequências de ressonância. Outras tecnologias, como o TCBR, reduzem e amortecem rapidamente os torques subsíncronos do eixo. Portanto, o efeito dos controladores FACTS na capacidade das máquinas é duplo: eles aumentam a potência ativa que pode ser extraída do gerador ao garantir a estabilidade do sistema de transmissão e, ao mesmo tempo, protegem o gerador contra tensões mecânicas destrutivas (torques torcionais) (HINGORANI et al., 2000).

O controle de tensão é uma função primordial dos Controladores FACTS, cujos efeitos variam significativamente de acordo com o tipo de sistema elétrico. Em sistemas síncronos (com máquinas rotativas), compensadores shunt como o SVC e STATCOM atuam de maneira análoga a condensadores síncronos, regulando a potência reativa ao controlar a amplitude da sua tensão interna em relação à tensão do sistema. Ao gerar potência reativa (super-excitado) ou absorvê-la (sub-excitado), o SVC/STATCOM fornece suporte dinâmico de tensão, melhora a estabilidade transitória e amortece as oscilações de potência.

Em contraste, sistemas acoplados por inversor (*VSC-based FACTS*), como o STATCOM, oferecem um controle mais robusto em baixa tensão, pois a sua corrente de saída é controlada independentemente da tensão do sistema, diferentemente do SVC, cuja saída máxima de VARs decresce com o quadrado da tensão. Esses controladores baseados em VSC têm tempos de resposta e desempenho dinâmico superiores. Já para sistemas assíncronos, onde não é possível manter o sincronismo, VSCs em configuração *back-to-back* podem ser usados como um acoplamento assíncrono. Além disso, o FACTS é essencial para o controle de tensão em linhas com alto carregamento capacitivo, como cabos submarinos, onde o UPFC pode reduzir o comprimento efetivo do cabo ao controlar a magnitude da tensão. Em suma, os FACTS modernos proporcionam um controle de tensão mais rápido e eficaz em condições dinâmicas do que as tecnologias de impedância variável.

Na Figura 1 (a) são demonstrados os sinais de onda de um capacitor, cujo sinal da corrente está adiantado em relação ao sinal da tensão. Em contrapartida, na Figura 1 (b), o sinal da corrente está atrasado em relação ao sinal da tensão.

Figura 1 - (a) Forma de onda da tensão e corrente de um capacitor (b) Forma de onda da tensão e corrente de um indutor.



Fonte: NDT Resource Center.

A potência reativa apresenta uma dualidade complexa nos sistemas de potência, sendo simultaneamente um elemento indispensável e uma fonte de desafios operacionais. Diversos aspectos demonstram sua relevância e seus efeitos:

- **Requisitos de Carga e Rede:** Uma parcela significativa das cargas elétricas necessita de potência reativa para seu funcionamento. Adicionalmente, o próprio sistema de transmissão, composto por linhas e transformadores, absorve reativo, o que demanda o suprimento contínuo por uma fonte adequada.
- **Perdas e Impacto na Tensão:** O fluxo de potência reativa das fontes para as cargas impõe efeitos negativos, notadamente o aquecimento adicional nos condutores de transmissão e o surgimento de afundamentos ou elevações de tensão na rede.

- Limitação da Geração Ativa: A capacidade de geração de potência reativa por uma máquina pode impor um limite à sua capacidade de geração de potência ativa.

O dilema fundamental reside no fato de que, embora a potência reativa seja necessária para suprir as cargas e as perdas do sistema, o seu excesso circulante acarreta superaquecimento e afundamentos ou elevações de tensão indesejáveis.

A solução mais lógica para este dilema seria integrar fontes de reativos no local exato de consumo. No entanto, esta abordagem é inviável na prática: a vasta interconexão de milhões de fontes, linhas e cargas exigiria um número igualmente massivo de fontes de reativos, todas complexamente controladas para fornecer a quantidade exata no momento preciso.

Uma alternativa mais pragmática é disponibilizar a compensação reativa em pontos de agregação de múltiplas cargas, como no alimentador de uma subestação ou nos terminais de grandes linhas e transformadores. Esta estratégia, contudo, revela a distinção crucial entre dois objetivos de controle:

- Controle do Fator de Potência: Visa fornecer a quantidade exata de reativo para igualar o consumo.
- Controle de Tensão: Busca manter os níveis de tensão constantes, independentemente da demanda exata de reativo.

A potência reativa é, portanto, a chave e a complicação para o controle da tensão da rede. A reatância intrínseca das linhas cria um afundamento de tensão que deve ser compensado, independentemente de a linha estar transferindo potência ativa, reativa ou ambas. A dificuldade é ampliada pelo fato de que a necessidade de fornecimento de reativo às cargas aumenta as perdas na transmissão, o que, por sua vez, exige mais reativo da fonte original (HINGORANI et al., 2000).

É neste contexto complexo do controle da potência reativa e dos seus impactos na estabilidade da tensão que se insere o presente trabalho. Este estudo tem como objetivo principal investigar e analisar a aplicação do Compensador Estático de Var (SVC) a um caso específico do sistema de potência.

1.4 ESTRUTURA

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos. O primeiro capítulo contextualiza o tema de estudo e justifica seu interesse. O segundo capítulo traz os diferentes tipos de dispositivos FACTS, exemplos de cada tipo e o contexto em que são inseridos. O terceiro capítulo apresenta o processo de modelagem no MATLAB/Simulink do SVC. O quarto capítulo expõe os resultados obtidos da modelagem do SVC em um sistema de 440kV, apresentando o desempenho no controle de tensão e suporte a compensação de reativos. Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais.

2 SISTEMAS FLEXÍVEIS DE TRANSMISSÃO – FACTS

2.1 INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos, as tecnologias para os sistemas da rede de alta tensão baseada na Eletrônica de Potência tiveram um efeito imenso no contexto dos sistemas elétricos de geração e transmissão. Além disso, ferramentas de análise, softwares e modelos tiveram avanço, sendo utilizados além do planejamento de novos sistemas, bem como aumentar a capacidade dos sistemas que já existem (ASARE et al., 1994).

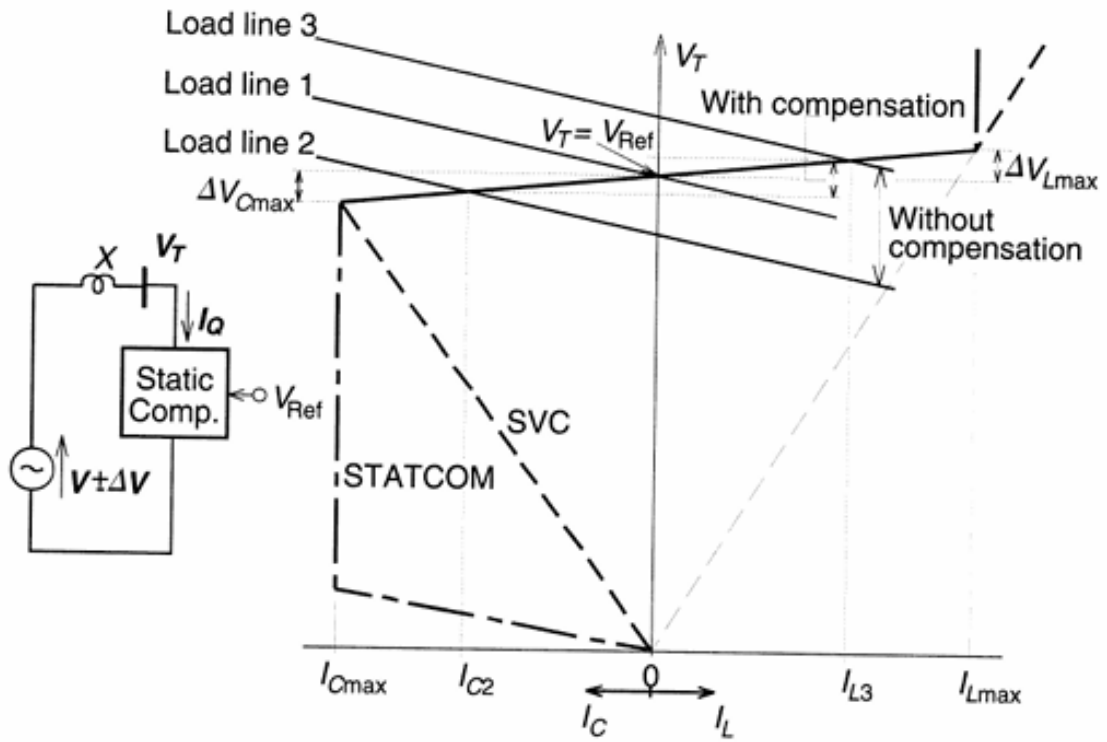
Dado esse avanço, os sistemas de transmissão foram além do que interligar pontos entre centros de geração e carga, são utilizados para diminuir custos na parte da geração, melhorar a confiabilidade no fornecimento de energia pelo aumento de interligações entre regiões que antes não eram conectadas. Outro fato a ser citado é a privatização do setor de transmissão, cuja competitividade gerou novos requisitos e padrões de desempenho. Além disso, a inclusão da geração distribuída no sistema elétrico necessitou que o sistema fosse adaptado para tal inclusão.

Conforme os sistemas ficaram mais interligados e aumentando a quantidade de energia transportada, a parte operacional também ficou mais complexa. Isso trouxe uma maior insegurança em relação às falhas e problemas que podem vir a ocorrer. Problemas como o controle inadequado do fluxo de potência, excesso de reativos em várias regiões, oscilações e gargalos cada vez mais presentes dificultaram o uso completo do potencial do sistema de transmissão. Dessa forma, desenvolveu-se maneiras de controlar esse fluxo em pontos estratégicos.

Nesse contexto, os FACTS são inseridos, uma vez que podem assegurar confiabilidade operacional, possuir custos inferiores em relação a construção de novas linhas de transmissão, além dos impactos sociais na construção das linhas.

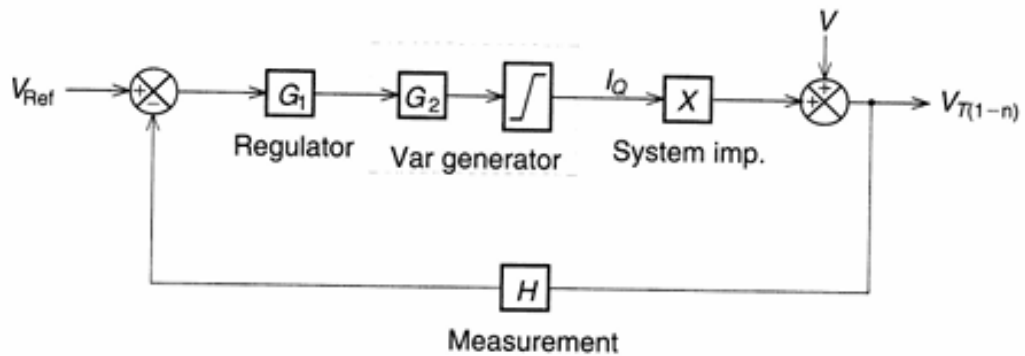
Na Figura 2 é apresentada a curva característica V-I de compensadores estáticos representando um estado estacionário. O comportamento dinâmico de um compensador em um limite de compensação normal pode ser caracterizado pelo diagrama de blocos da função de transferência mostrada pela Figura 3.

Figura 2 - Curva característica V-I de um SVC e STATCOM



Fonte: Hingorani & Laszlo, 2000.

Figura 3 – Diagrama de blocos da função de transferência básica do compensador estático (var)



Fonte: Hingorani & Laszlo, 2000.

Em um limite de operação linear de um compensador, o terminal de tensão V_t pode ser expresso em termos da tensão interna e a tensão de referência, conforme a equação:

$$V_t = V \frac{1}{1 + G_1 G_2 H X} + V_{ref} \frac{G_1 G_2 H X}{1 + G_1 G_2 H X} \quad (1)$$

Como o objetivo é estabelecer a regulação de tensão no terminal em relação à tensão do sistema, a tensão de referência é considerada nula e uma pequena variação. Então a variação de amplitude no terminal ΔV_t em relação a variação de amplitude do sistema de potência ΔV pode ser expresso como:

$$\frac{\Delta V_t}{\Delta V} = \frac{1}{1 + G_1 G_2 H X} = \frac{1}{1 + G H X} \quad (2)$$

Onde:

$$G_1 = \frac{1/k}{1 + T_1 s} \quad (3)$$

$$G_2 = e^{-T_d s} \quad (4)$$

$$G = G_1 G_2 = \frac{1/k}{1 + T_1 s} e^{-T_d s} \quad (5)$$

$$H = \frac{1}{1 + T_2 s} \quad (6)$$

Em que T_1 é a constante de tempo principal do controlador PI (entre 10-50 ms dependendo do atraso de condução do gerador de VAR), T_2 é a constante de tempo do circuito de medição de amplitude (geralmente entre 8-16 ms), T_d é o atraso de condução do gerador VAR (2,5 ms para TCR, 5 ms para o TSC e 0,2-0,3 ms para o conversor), $X = \text{Im } Z$ é a parte reativa da impedância do sistema, K é a inclinação de regulação (entre 1-5%) e S é o operador de Laplace.

Para condições sob estado estacionário ($s \rightarrow 0$), a equação se torna:

$$\frac{\Delta V_t}{\Delta V} = \frac{1}{1 + \frac{X}{k}} \quad (7)$$

Tal equação confirma que a inclinação se torna menor, a tensão no terminal permanece constante, independente da variação de tensão do sistema. De maneira similar, com o aumento da inclinação, a tensão no terminal se torna desregulada. Nota-se que o comportamento dinâmico do compensador determinado pela equação (2) é a função da impedância do sistema de potência, que é a impedância do sistema é uma parte integrante da malha fechada. Ou seja, o tempo de resposta, e por isso o controle de estabilidade depende da impedância do sistema.

2.2 ELETRÔNICA DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE CORRENTE ALTERNADA

A aplicação da eletrônica de potência em sistemas de corrente alternada representa um avanço sob diversas características, uma vez que os sistemas são controlados mecanicamente em larga escala. Os equipamentos que fazem a utilização de componentes eletrônicos desempenham propostas como a conversão de potência, controle de parâmetros inter-relacionados que gerem a operação, como impedância, tensão, corrente e ângulo de fase.

Os chamados controladores FACTS, em conjunto com o método HVDC (*High Voltage Direct Current*), são os responsáveis pelas pesquisas desenvolvidas e o avanço da eletrônica de potência no sistema de transmissão. O sistema HVDC é utilizado amplamente para conectar sistemas que possuem longas distâncias, frequências diferentes ou controle incompatível de frequência. Tal sistema consiste na conversão AC para DC em um lado do sistema, e DC para AC no outro lado (HINGORANI et al., 2000).

Os dispositivos FACTS são utilizados em casos para o controle de potência e aumento da capacidade de transferência de fluxo de potência nas linhas, fazendo com que atuem próximo ao seu limite e diferentemente do HVDC, são vistos como soluções locais, não atuando em longas distâncias. Tais fatos ocorrem, pois os FACTS podem controlar os parâmetros inter-relacionados (HINGORANI et al., 2000).

Este conceito surgiu com Hingorani, que propôs a utilização da eletrônica de potência no controle de sistemas de corrente CA, a fim de obter flexibilidade, do mesmo modo que em sistemas HVDC. Os dispositivos FACTS consistem na utilização de tiristores de potência, e de semicondutores auto comutados, além de poderem ser empregados de modo individual ou agrupados, para controlar os parâmetros citados anteriormente (WATANABE et. al, 1997).

2.3 FLUXO DE POTÊNCIA NO SISTEMA ELÉTRICO

Os sistemas de transmissão, além de serem limitados por seus parâmetros físicos, frequentemente enfrentam o problema da inaptidão de direcionar o fluxo de potência conforme a necessidade. Dada a inexpressividade do armazenamento de energia elétrica, é imperativo que a geração e a demanda permaneçam balanceadas em tempo integral.

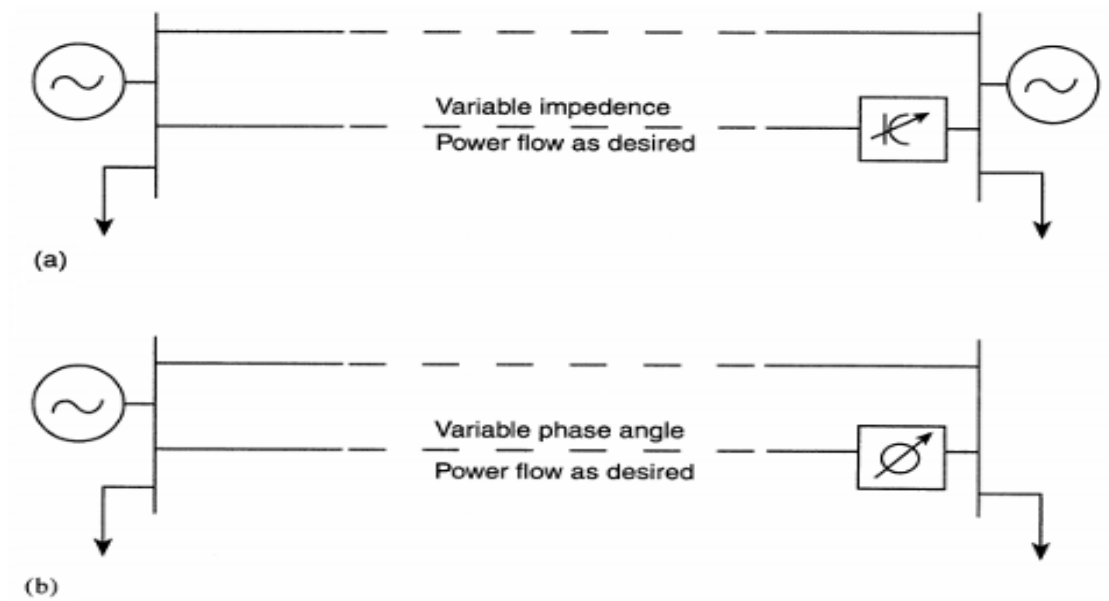
Em certa medida, o sistema elétrico possui uma capacidade de autorregulação, isto é, se a geração for inferior à carga, a tensão e a frequência diminuem, resultando na redução da demanda da carga até que o equilíbrio com o total gerado (descontadas as perdas de transmissão) seja alcançado. Contudo, essa margem de autorregulação é estreita. Uma situação perigosa ocorre se a tensão e a potência reativa aumentarem simultaneamente, pois a carga também aumentará, fazendo com que a frequência continue a cair, levando o sistema a um colapso. Alternativamente, a insuficiência de potência reativa pode causar um colapso de tensão. Em condições normais, com geração adequada disponível, a potência ativa flui das áreas de excedente para as áreas de déficit, distribuindo-se por todos os caminhos paralelos disponíveis.

A introdução dos Controladores FACTS (Sistemas de Transmissão AC Flexíveis) é crucial para solucionar essa inabilidade de controle de fluxo. Por meio do controle de impedância (ilustrado na Figura 4a), controle de ângulo de fase (Figura 4b) ou injeção série de tensão, o fluxo de potência pode ser gerenciado conforme a necessidade operacional.

Para exemplificar, considere um cenário na Figura 5, onde geradores alimentam um centro de carga através de um sistema malhado de três linhas (AB, BC e AC), com capacidades nominais de 1000 MW, 1250 MW e 2000 MW, respectivamente. Se um gerador produz 2000 MW e o outro 1000 MW, o total de 3000 MW é distribuído segundo as impedâncias série das linhas. Neste caso, as linhas transportariam 600 MW, 1600 MW e 1400 MW (Figura 5a), o que resultaria na sobrecarga da linha BC (1600 MW excedendo seu limite de 1250 MW). Consequentemente, a geração teria que ser reduzida no ponto A.

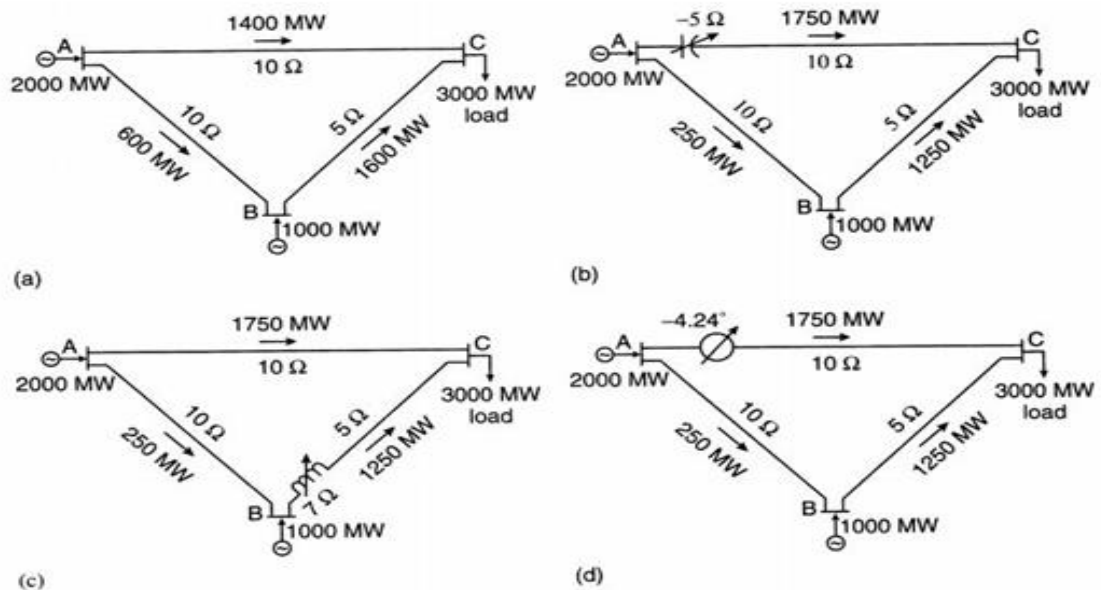
No entanto, se um banco de capacitores com uma reatância de -5Ω for inserido em uma das linhas (Figura 5b), a impedância é efetivamente reduzida para 5Ω . Essa intervenção altera a distribuição de fluxo para 250 MW na linha AB, 1250 MW na linha BC e 1750 MW na linha AC. Assim, o fluxo de potência pode ser controlado para respeitar questões contratuais, limites térmicos das linhas, perdas de transmissão e a programação das centrais geradoras. É importante notar, contudo, que um banco de capacitores mecanicamente chaveado teria seu número de operações severamente limitado, uma vez que o carregamento das linhas muda continuamente devido a variações de carga, programação de geração ou ocorrência de faltas.

Figura 4 - Controle de Fluxo de Potência



Fonte: Hingorani & Laszlo, 2000.

Figura 5 - Fluxo de potência em sistema malhado



Fonte: Hingorani & Laszlo, 2000.

A utilização de um capacitor em série em uma linha de transmissão pode, no entanto, levar ao risco de ressonância subsíncrona (tipicamente na faixa de 10 a 50 Hz em sistemas de 60 Hz), o que representa um perigo significativo para a integridade dos equipamentos.

O termo ressonância subsíncrona (RSS), de acordo com o IEEE, define uma condição no sistema de potência na qual a rede elétrica troca energia com o eixo de um conjunto turbina-gerador em uma ou mais frequências naturais do sistema

combinado, que estão abaixo da frequência síncrona da rede (IEEE SSR WORKING GROUP, 1981). Este tipo de fenômeno pode gerar:

- **Interações Torcionais:** Ocorre quando as frequências naturais de oscilação do sistema turbina-gerador são refletidas na rede elétrica. Se essas frequências forem compatíveis com as frequências naturais da rede, correntes produzidas podem induzir torques eletromagnéticos que reforçam as oscilações primárias do rotor (TOMIM, 2004).
- **Amplificação de Torque:** Em sistemas compensados, os torques eletromagnéticos resultantes de distúrbios oscilam na frequência $\omega_s - \omega_n$ (ω_s é a frequência síncrona e ω_n é a frequência natural do sistema). Se essa frequência coincidir com uma frequência natural do eixo turbina-gerador, os torques resultantes podem ser muito mais intensos do que aqueles produzidos por uma simples falta trifásica, reduzindo a vida útil do eixo por fadiga mecânica (TOMIM, 2004).

Para mitigar esse risco e aumentar a flexibilidade, o uso de capacitores em série controlados por tiristores é fundamental. Se parte ou a totalidade da capacitância em série for controlada por tiristores, o dispositivo pode ser utilizado conforme a demanda do sistema. Além disso, a modulação rápida do dispositivo permite o amortecimento imediato de quaisquer condições de ressonância subsíncrona ou oscilações de frequência no fluxo de potência.

Essa capacidade dinâmica permite que o sistema transite de um estado estável para outro de forma segura, eliminando o risco de danos ao eixo de geradores e reduzindo a probabilidade de colapso do sistema. Em outras palavras, um capacitor em série controlado por tiristor (TCSC - *Thyristor Controlled Series Capacitor*) contribui significativamente para a estabilidade do sistema. Apesar dos benefícios do controle total por tiristores, por razões econômicas, é comum encontrar soluções híbridas, onde a compensação série é controlada parcialmente por tiristores e parcialmente por chaveamento mecânico.

Resultados semelhantes no ajuste de fluxo de potência em regime permanente e na redução de oscilações indesejadas podem ser obtidos por outros métodos:

1. **Aumento de Impedância (Reator Série):** Aumentar a impedância de uma das linhas, inserindo um reator em série (conforme sugerido na Figura 5c), também pode favorecer o ajuste do fluxo de potência e reduzir oscilações.

2. Regulador de Ângulo de Fase (*Phase Angle Regulator* - PAR): Um regulador de ângulo de fase (Figura 5d) pode ser inserido no lugar do capacitor ou reator série para alcançar os mesmos propósitos de controle de fluxo. Neste caso, o regulador atua pela modificação do ângulo de fase entre as barras.
3. Injeção Série de Tensão Variável: Os mesmos resultados de controle de fluxo também podem ser obtidos pela injeção de uma tensão variável em série na linha de transmissão.

2.4 TIPOS DE DISPOSITIVOS FACTS

Existem quatro tipos de dispositivos FACTS, são eles: Série, Paralelo, Combinado Série-Série e Combinado Série-Paralelo.

Dispositivos ligados em paralelo funcionam como fontes de corrente, ou seja, eles injetam ou absorvem corrente na linha. Por isso, são uma boa opção para controlar a tensão e ajudar a aliviar oscilações na região que estão instalados. Enquanto os dispositivos conectados em série atuam como fontes de tensão na linha, alterando a queda de tensão entre seus terminais. Eles são usados para controlar diretamente o fluxo de potência que passa e para reduzir oscilações, sendo mais eficientes do que os dispositivos em paralelo. A combinação dessas duas abordagens, série e paralelo, aproveita o melhor de cada uma, permitindo um controle mais eficaz tanto do fluxo de potência quanto da tensão na linha.

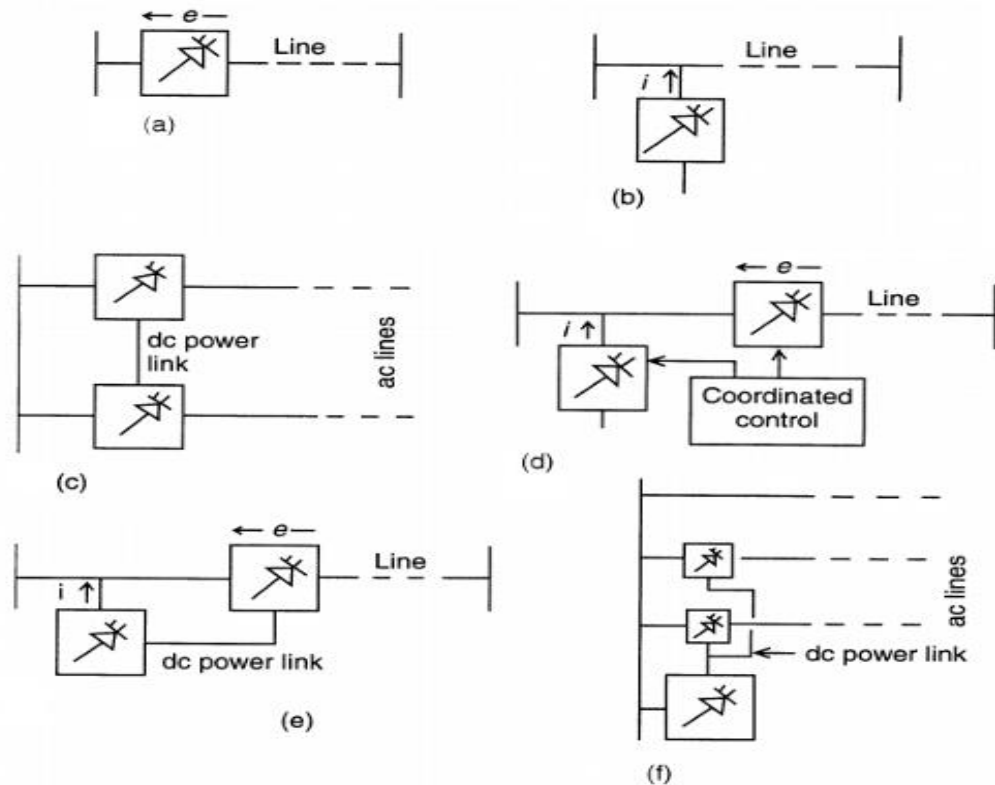
O Controlador Série, ilustrado na Figura 6a, é constituído por uma impedância variável, como um capacitor, reator, fonte variável de frequência principal, frequências subsíncronas ou harmônicas.

Os dispositivos combinados em série-série podem ser formados por controladores de série que atuam de forma coordenada em sistemas de transmissão com múltiplas linhas. Também podem ser controladores unificados, apresentado na Figura 6c, nos quais cada controlador de série fornece compensação reativa independente para cada linha, além de permitir a transferência de potência ativa entre as linhas por meio de uma conexão de potência.

Os dispositivos combinados em Série-Paralelo podem ser formados por controladores Série e Paralelo, conforme visto na Figura 6d que atuam de forma coordenada em sistemas de transmissão. Também pode ser um Controlador Unificado de Fluxo de Potência, apresentado na Figura 6e. O componente em paralelo

injeta corrente, e o componente série, tensão. Porém, quando ambos os componentes estiverem ativos, pode ocorrer troca de potência ativa entre eles.

Figura 6 - Tipos de dispositivos FACTS



Fonte: Hingorani & Laszlo, 2000.

Embora não seja seu propósito principal, o Controlador Série também pode ser empregado para manter a tensão dentro de uma faixa específica. Flutuações de tensão são, em grande parte, uma consequência da queda de tensão na impedância série dos elementos do sistema. Consequentemente, adicionar ou retirar tensão por meio de um Controlador Série pode ser uma maneira eficaz de otimizar o perfil de tensão da linha.

Entretanto, para a aplicação específica de manter um perfil de tensão adequado em uma barra de subestação, o Controlador Paralelo é consideravelmente mais eficaz. Uma grande vantagem destes controladores é a capacidade de gerenciar a tensão da barra de forma independente das linhas individuais a ela conectadas. Em contraste, um Controlador Série pode ser necessário para cada linha conectada à barra, especialmente quando o objetivo é otimizar a saída de uma linha específica.

No entanto, a necessidade de múltiplos controladores série não deve ser o fator decisivo na escolha entre os dois tipos. Isso porque a potência nominal de um

Controlador Paralelo deve ser significativamente maior do que a de um Controlador Série para fornecer um suporte reativo equivalente. Adicionalmente, o Controlador Paralelo não é utilizado para controle direto de fluxo de potência. Por outro lado, os Compensadores Série devem ser dimensionados para operar e resistir a contingências, sobrecarga dinâmica e curtos-circuitos, o que não é um requisito tão rigoroso para os Controladores Paralelos.

A solução mais abrangente reside no Controlador Combinado Série-Paralelo, que é capaz de fornecer tanto o controle de fluxo de potência quanto o controle de tensão. Este pode ser implementado como uma unidade única operando de forma coordenada com controladores individuais de linha, conforme ilustrado na Figura 6f. Essa configuração unificada pode proporcionar benefícios adicionais, como um controle mais eficaz do fluxo de potência reativa no sistema.

Em termos de tecnologia, os Controladores FACTS podem ser baseados em tiristores, com ou sem a capacidade de desligamento de *gate* (GTOs, IGBTs etc.).

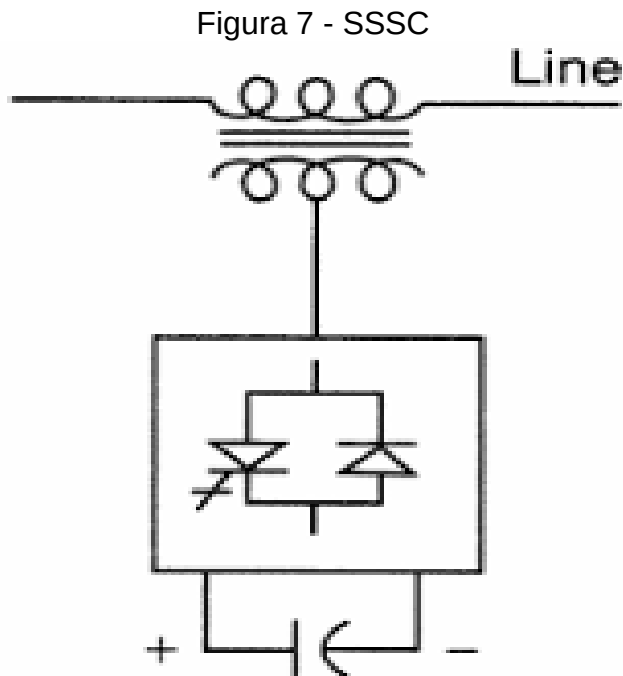
2.5 CONTROLADORES SÉRIE

2.5.1 SSSC

O SSSC, *Static Synchronous Series Compensator*, ou Compensador Síncrono Estático em Série, é um dispositivo cuja operação ocorre sem uma fonte externa cuja tensão de saída é em quadratura com a corrente de linha, controlada independentemente desta corrente, com a finalidade de aumentar ou diminuir a queda de tensão, isto é, controlar a potência transmitida. Além disso, este dispositivo pode incluir o armazenamento de energia transitório ou dispositivos de absorção de energia para melhorar o comportamento dinâmico do sistema, adicionando compensação temporária de potência ativa, para aumentar ou diminuir momentaneamente, a queda de tensão real na linha.

É um dos mais importantes controladores FACTS. É similar ao STATCOM, em que pode consistir em um conversor de fonte de tensão ou fonte de corrente. Geralmente, a tensão injetada é pequena em relação a tensão de linha, e a isolamento deve ser muito alta. A relação de transformação é feita sob medida para obter uma modelagem mais econômica, devido ao primário, secundário e o conversor suportarem a corrente de linha mesmo em caso de falta. Caso não tenha uma fonte

extra de energia, o SSSC pode apenas injetar tensão variável, que seja 90° adiantado ou atrasado em relação a corrente.



Fonte: Hingorani & Laszlo, 2000.

2.5.2 IPFC

O IPFC, Interline Power Flow Controller, ou Controlador de Fluxo de Potência entre Linhas, é a combinação de dois ou mais SSSCs, que são conectados por uma conexão DC comum, de modo a facilitar o fluxo de potência ativa bidirecional entre os terminais AC dos SSSCs, e são controlados para fornecer compensação reativa independente a partir do ajuste do fluxo de potência ativa em cada linha e manter a distribuição desejada do fluxo de potência reativa entre as linhas. A construção do IPFC pode contar com a inclusão do STATCOM, acoplado com a conexão DC comum dos IPFCs, a fim de fornecer compensação reativa em shunt, e absorver ou suprir o déficit de potência ativa dos SSSCs.

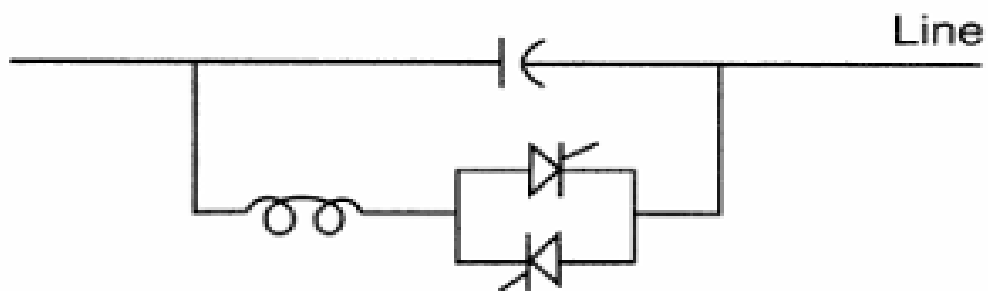
2.5.3 TCSC

O TCSC, *Thyristor Controlled Series Capacitor*, ou Capacitor em Série Controlado a Tiristor, é um compensador de reativos capacitivo, que consiste em banco de capacitores em série com a linha e um indutor controlado a tiristores (sem o

desligamento de gate) em paralelo, para fornecer suavemente uma variação da reatância capacitiva.

Considera-se uma alternativa ao SSSC, e baseia-se na conexão de um reator controlado a tiristor em paralelo com o banco de capacitor. Quando o ângulo de disparo do TCR encontra-se entre 180° e -180° , a impedância capacitiva aumenta. Enquanto o ângulo de disparo é 90° , o reator torna-se totalmente condutivo, e a impedância total é indutiva, devido a impedância do reator ser desenvolvida para ser muito menor que a da impedância dos capacitores série. Além disso, o TCSC ajuda a limitar a corrente de falta e pode consistir em apenas um ou o conjunto de capacitores menores de diferentes valores para alcançar uma performance superior.

Figura 8 - TCSC



Fonte: Hingorani & Laszlo, 2000.

2.5.4 TSSC

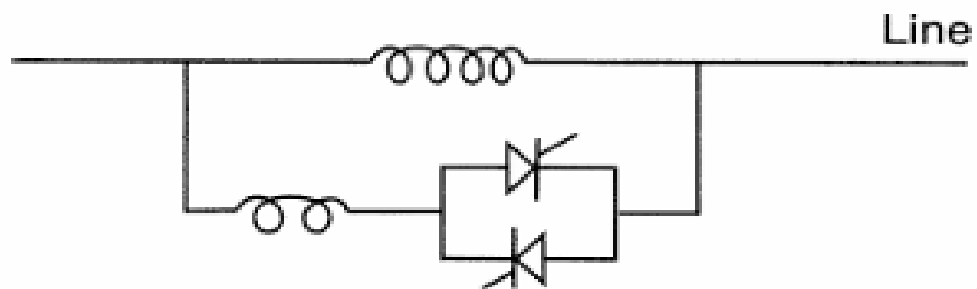
O TSSC, *Thyristor-Switched Series Capacitor*, ou Capacitor em Série Chaveado a Tiristor, baseado em bancos de capacitores série, conectados em paralelo com reator chaveado a tiristor, para fornecer controle discreto da reatância capacitiva série. O chaveamento do ângulo de disparo de 90° ou 180° , mas sem o controle dele, pode reduzir os custos e perdas do controlador. Pode-se considerar a modelagem de um módulo controlado a tiristor e outro a chaveamento a tiristor.

2.5.5 TCSR

O TCSR, *Thyristor-Controlled Series Reactor*, ou Reator em Série Controlado a Tiristor, é um compensador de reativos indutivo, consiste na conexão em paralelo de reator série com um reator controlado a tiristor, TCR, para fornecer uma variação suave da reatância indutiva. No momento em que o ângulo de disparo do TCR é 180° ,

ele deixa de conduzir, e o reator não controlado atua como um limitador de falta de corrente. Conforme o ângulo diminui de 180° , a indutância da rede decai, até que o ângulo de disparo chega a 90° , quando a indutância da rede é a combinação paralela dos dois reatores. Do mesmo modo que o TCSC, o TCSR pode ser uma unidade grande ou pequenas unidades em série.

Figura 9 -TCSR



Fonte: Hingorani & Laszlo, 2000.

2.5.6 TSSR

O TSSR, *Thyristor-Switched Series Reactor*, ou Reator em Série Chaveado a Tiristor, é um compensador de reativos indutivo, baseado em reator série conectado em paralelo com um reator chaveado a tiristor, para prover um controle discreto da reatância indutiva.

2.6 CONTROLADORES EM PARALELO

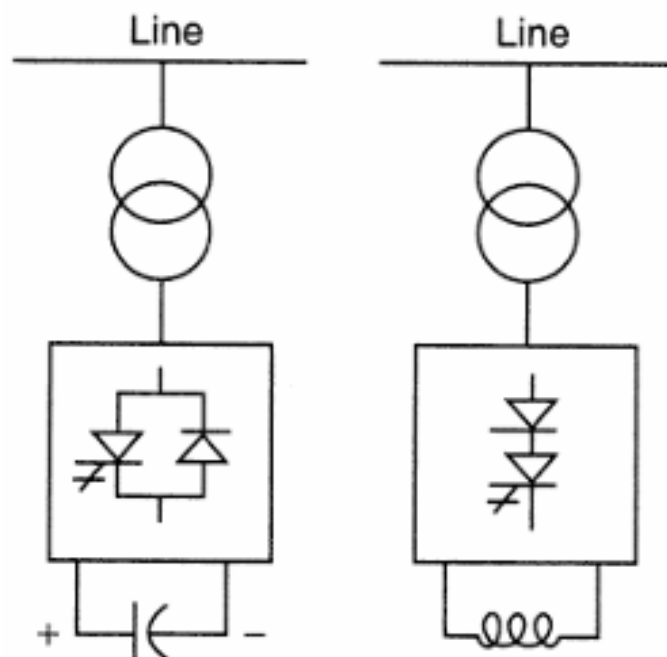
2.6.1 STATCOM

O STATCOM, *Static Synchronous Compensator*, ou Compensador Síncrono Estático, é um gerador síncrono estático que opera como um compensador estático de reativos. Este dispositivo é conectado em shunt, cuja corrente capacitiva ou indutiva de saída pode ser controlada de maneira independente da tensão do sistema.

Compara-se as máquinas rotativas utilizadas na compensação de reativos em várias características, e encontra-se entre os principais dispositivos FACTS. A Figura 10 apresenta este dispositivo, sendo conectado à uma fonte de tensão e outro à uma fonte de corrente. No primeiro caso, a troca de potência reativa no sistema é realizada

pela variação da amplitude da tensão de saída, caso a amplitude na saída estiver acima da tensão no sistema, é inserido potência reativa (capacitiva), por outro lado, se estiver abaixo, é absorvido potência reativa (indutiva). Isto é, o controle da tensão de saída ocorre de modo que para obter uma determinada tensão do lado AC, o fluxo de corrente reativa necessário é obtido pelo ajuste automático da tensão do capacitor, atuando como uma fonte DC para o conversor. Além disso, o STATCOM pode ser utilizado como um filtro ativo para absorver harmônicos do sistema.

Figura 10 - STATCOM



Fonte: Hingorani & Laszlo, 2000.

2.6.2 SSG

O SSG, Static Synchronous Generator, ou Gerador Síncrono Estático é um conversor de potência com chaveamento estático auto comutado, conectado a uma fonte de energia adequada, utilizado para produzir tensões de saída com várias fases ajustáveis, que podem ser ligadas a um sistema AC, para realizar a troca independentemente da potência ativa e reativa.

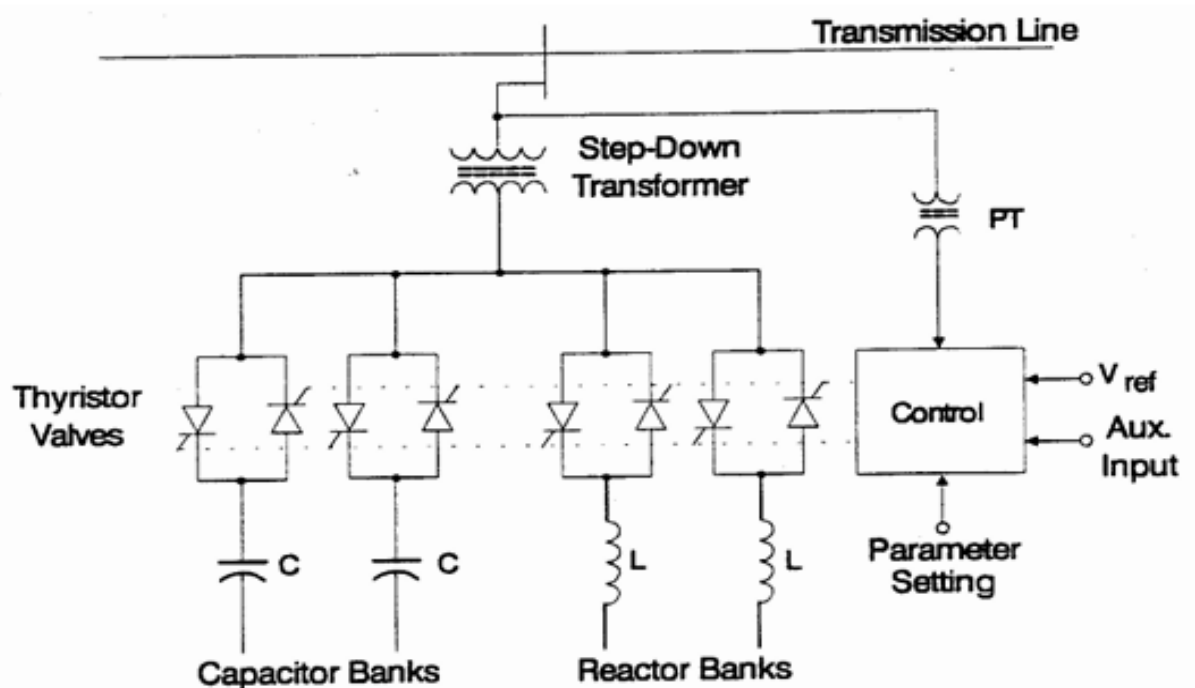
Este dispositivo surge da combinação do STATCOM com qualquer fonte que introduza ou absorva potência.

2.6.3 SVC

O SVC, *Static Var Compensator*, ou Compensador Estático de Reativos, é um dispositivo conectado em shunt que insere ou absorve reativos no sistema, a saída deste dispositivo é ajustada de forma a trocar corrente capacitiva ou indutiva para manter ou controlar características da rede.

Conhecido também por Compensador Estático de Reativos, CER, é a disposição de um reator controlado ou chaveado a tiristor e/ou um capacitor chaveado a tiristor, ou a junção destes, visto na Figura 11. Comparando-se no âmbito da capacidade de potência ao STATCOM, o SVC possui menor custo.

Figura 11 - SVC



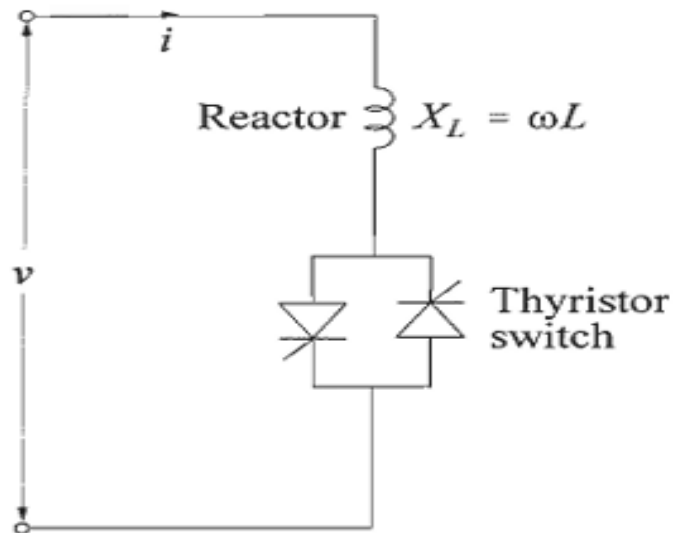
Fonte: Mathur, R. M.; Varma, R. K., 2002.

2.6.4 TCR

O TCR é um reator controlado a tiristor, conectado em shunt, cujo valor da reatância é mudado de maneira contínua pelo controle de condução parcial da válvula tiristorizada.

É um subconjunto do SVC, visto na Figura 12, em que o controle do tempo de condução e conseqüentemente a corrente é feita pelo ângulo de disparo de uma chave tiristorizada.

Figura 12 -TCR



Fonte: Gonzalez-Longatt, F. M., 2004.

2.6.5 TSR

O TSR é um reator chaveado a tiristor, conectado em shunt, cuja reatância efetiva varia de forma progressiva, pela condução total ou zero da válvula tiristorizada.

Este dispositivo é outro subconjunto do SVC, em que são dispostos indutores conectados em shunt, chaveados por tiristores sem qualquer ângulo de disparo para o controle da potência reativa do sistema. Utilizar estes tiristores possuem menos custos, embora não seja possível ter um controle contínuo.

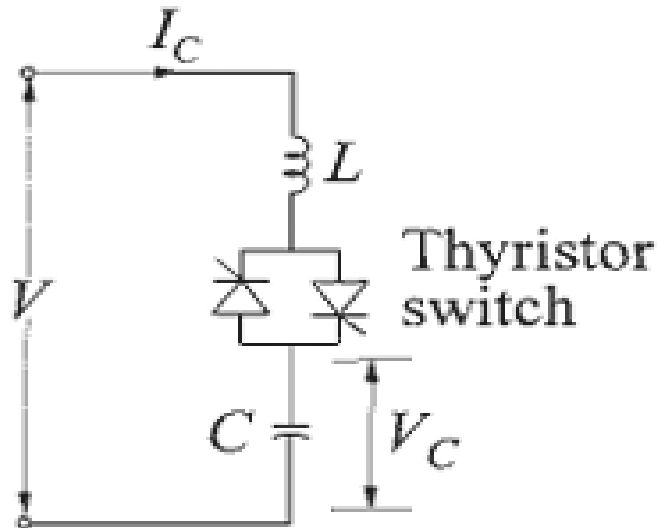
2.6.6 TSC

O TSC é um dispositivo composto por um capacitor chaveado a tiristor, conectado em shunt, cujo valor da reatância é mudado de maneira progressiva pela condução total ou zero da válvula tiristorizada.

Assim como o TCR e TSR, é um subconjunto do SVC, cujos tiristores são utilizados para ligar e desligar, sem o ângulo de disparo, capacitores em shunt, de

modo a garantir controle de potência reativa no sistema. Contrário ao TCR, o TSC não possui controle contínuo a partir do ângulo de disparo.

Figura 13 - TSC



Fonte: Gonzalez-Longatt, F. M., 2004.

2.6.7 SVG

O SVG, *Static Var Generator*, ou Gerador Estático de Reativos, é um sistema que é capaz de controlar corrente indutiva e/ou capacitiva de um sistema, e portanto, gerar ou absorver potência reativa. Geralmente, consiste em dispositivos conectados em shunt, como TCR e TSC.

É reconhecido como uma fonte de potência reativa, que com o controle adequado, pode ser disposto como um compensador de reativos.

2.6.8 SVS

O SVS, *Static Var System*, ou Sistema Estático de Reativos, é uma combinação de diferentes compensadores estáticos e chaveados mecanicamente, cujas saídas são coordenadas.

2.6.9 TCBR

O TCBR, *Thyristor Controlled Braking Resistor*, ou Resistor de Frenagem Controlado a Tiristor, é um dispositivo composto por um resistor chaveado a tiristor, conectado em shunt, com a finalidade de controlar a estabilização do sistema ou amenizar a potência gerada durante uma perturbação.

Este dispositivo envolve o chaveamento de um resistor, acionado por um ângulo de disparo. Para diminuir os custos, utiliza-se tiristores sem o ângulo de disparo, porém, ao utilizar tiristores com este ângulo, o controle de disparo de meio ciclo pode ser utilizado para atenuar oscilações de baixas frequências.

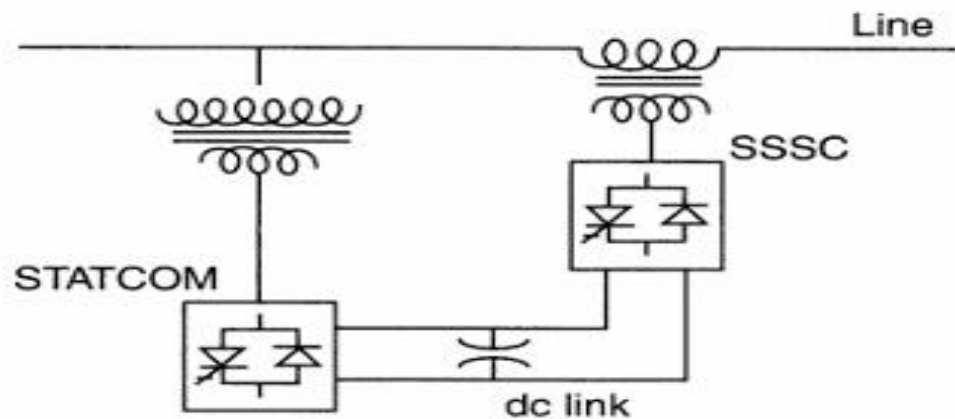
2.7 CONTROLADORES COMBINADOS SÉRIE-PARALELO

2.7.1 UPFC

O UPFC, *Unified Power Flow Controller*, ou Controlador Unificado de Fluxo de Potência, é uma combinação de compensadores síncronos estáticos (STATCOM) e compensadores estáticos série (SSSC), acoplados por uma conexão DC comum, para permitir o fluxo de potência real bidirecional entre as saídas em série dos terminais do SSSC e das saídas em paralelo dos terminais do STATCOM, e controladas para fornecer compensação ativa e reativa série e shunt simultaneamente, sem a utilização de uma fonte externa. O UPFC, através da injeção de tensão série sem restrições de ângulo, é capaz de controlar de maneira simultânea ou seletiva a tensão da linha de transmissão, impedância, e ângulo, ou de modo alternativo, o fluxo de potência ativa ou reativa. Além disso, pode fornecer controle independente de compensação reativa shunt.

Neste dispositivo, a potência ativa para o SSSC é obtida da própria linha pelo STATCOM, este último também é utilizado para o controle de tensão com o controle da sua própria potência reativa. Dessa forma, obtém-se um controle completo de potência ativa e reativa a partir da linha, bem como o controle de tensão.

Figura 14 - UPFC



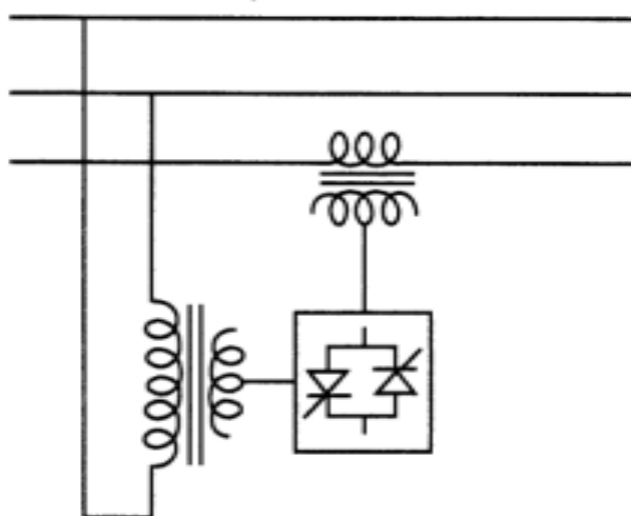
Fonte: Hingorani & Laszlo, 2000.

2.7.2 TCPST

O TCPST, *Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer*, ou Transformador Defasador Controlado a Tiristor, é um transformador defasador ajustado por um tiristor chaveado de modo a fornecer uma variação rápida do ângulo de fase.

Geralmente, a defasagem de fase é obtida pelo acréscimo de um vetor de tensão perpendicular em série com uma fase. Este vetor é derivado das outras duas fases pela conexão em paralelo dos transformadores. A tensão série perpendicular pode ser variada a partir de uma variedade de topologias. É referido também por TCPAR, *Thyristor-Controlled Phase Angle Regulator*.

Figura 15 - TCPST
3-phase line



Fonte: Hingorani & Laszlo, 2000.

2.7.3 IPC

O IPC, *Interphase Power Controller*, ou Controlador de Potência Interfase, é um controlador de potência ativa e reativa conectado em série, possuindo em cada fase, ramos capacitivos e indutivos propensos ao defasamento de ângulo de tensão separadamente. A potência ativa e reativa podem ser controladas de forma independente, ajustando o defasamento de fase ou até mesmo a impedância dos ramos, usando chaves mecânicas ou eletrônicas.

2.8 OUTROS TIPOS DE CONTROLADORES

2.8.1 TCVL

O TCVL, *Thyristor-Controlled Voltage Limiter*, ou Limitador de Tensão Controlado a Tiristor, consiste em um varistor de óxido de metal (MOV) usado para limitar a tensão em seus terminais durante condições transitórias. Pode ser conectado em série com um para-raio sem gap (10-20%), pode ser by-passada por uma chave tiristora para diminuir dinamicamente o nível de limitação de tensão.

2.8.2 TCVR

O TCVR, *Thyristor-Controlled Voltage Regulator*, ou Regulador de Tensão Controlado a Tiristor, consiste em um transformador controlado a tiristor que pode fornecer tensão em fase variável com controle contínuo. Pode ser um transformador normal com um comutador tap controlado a tiristor, ou um conversor de tensão AC-AC para injetar tensão AC variável em fase e em série com a linha. Possui um custo relativamente baixo, e pode ser muito eficiente no controle de fluxo de potência reativa entre os sistemas AC.

3 MODELAGEM

3.1 COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS - SVC

3.1.1 Funcionamento do SVC

O Compensador Estático de Reativos (SVC - *Static Var Compensator*) é um dos controladores FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) mais notáveis e de tecnologia mais estabelecida. Ele é um controlador em paralelo crucial, utilizado principalmente para regulação de tensão e compensação de potência reativa no sistema de transmissão.

A princípio, foi utilizado no âmbito das indústrias, de modo a controlar cintilações advindas das oscilações de tensão e na regulação da tensão devido ao uso de fornos a arco ou na partida de motores de grande porte.

O SVC é definido como um gerador ou absorvedor estático de VAR (potência reativa) conectado em derivação cuja saída é ajustada para trocar corrente capacitiva ou indutiva, com as seguintes propostas:

- Controle de oscilações da tensão;
- Prevenir o colapso do sistema de potência;
- Melhorar a estabilidade transitória e oscilações menores;
- Amortecer oscilações subsíncronas;
- Reduzir desequilíbrios de tensão e corrente.

Sua construção consiste em um sistema composto por elementos passivos, como reatores e capacitores, conectados em paralelo, dispositivos de chaveamento (ex. tiristores), e transformadores. Os elementos são controlados de modo coordenado, para fornecer ao sistema uma compensação rápida e variável da potência reativa, e dessa forma, possibilitar o controle da tensão de um barramento, de acordo com os parâmetros estabelecidos. Tais elementos podem ser divididos em TCR (*Thyristor-Controlled Reactor*) e TSC (*Thyristor-Switched Capacitor*).

3.1.2 Reator Controlado a Tiristor -TCR

O Reator Controlado a Tiristor se destaca entre os compensadores estáticos pela sua inerente flexibilidade operacional. Além de seu papel primordial no controle rápido e contínuo da tensão, o TCR pode ser empregado no controle dinâmico de diversas outras grandezas elétricas do sistema de potência.

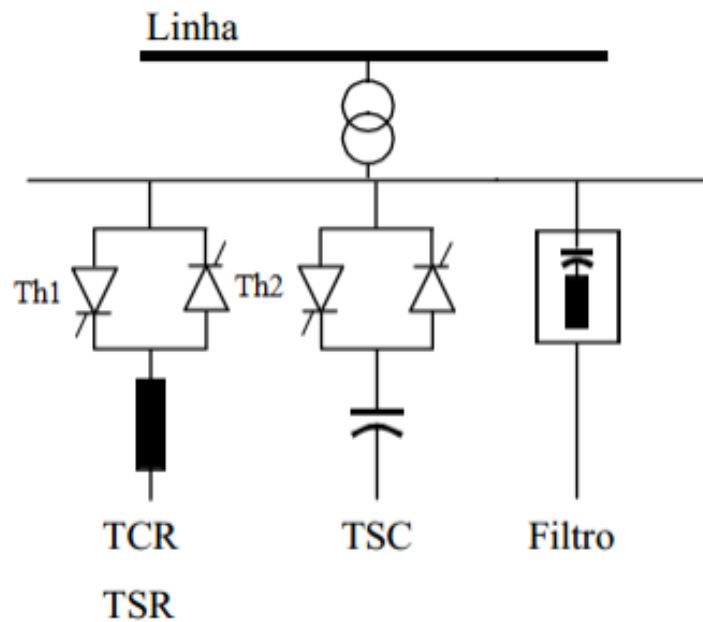
Conforme ilustrado em sua configuração básica (Figura 16), o TCR é composto por um reator linear em série com dois tiristores conectados em antiparalelo. Estes tiristores (Th1 e Th2) são responsáveis por conduzir a corrente em meio-ciclos alternados da onda AC.

O grau de absorção de potência reativa é definido pelo instante de disparo dos tiristores, que determina a quantidade de corrente que passará pelo reator. Se os tiristores Th1 (conduzindo no semi-ciclo positivo) e Th2 (conduzindo no semi-ciclo negativo) forem disparados no ângulo de 90° (momento em que a tensão aplicada ao reator é máxima), a corrente resultante será idêntica à de um reator fixo: senoidal, com magnitude máxima e atrasada em 90° em relação à tensão. Esta condição representa a absorção máxima de potência reativa indutiva.

Contudo, se o ângulo de disparo (α) for maior que 90° (ou seja, se houver um atraso na condução), o tempo em que a tensão é aplicada ao reator diminui. Consequentemente, a corrente que passa pelo reator será menor, e a potência reativa indutiva absorvida também será reduzida.

Portanto, ao modificar o instante de disparo dos tiristores, é possível controlar de forma contínua a corrente no reator e, assim, a potência reativa consumida. A faixa de controle varia desde o valor máximo de absorção a 90° até a absorção zero a 180° , conferindo ao TCR a capacidade de fornecer uma compensação indutiva variável e precisa.

Figura 16 - Topologia de um SVC



Fonte: Machado (2003).

A equação (8) expressa a tensão V_L medida nos terminais do indutor quando há condução.

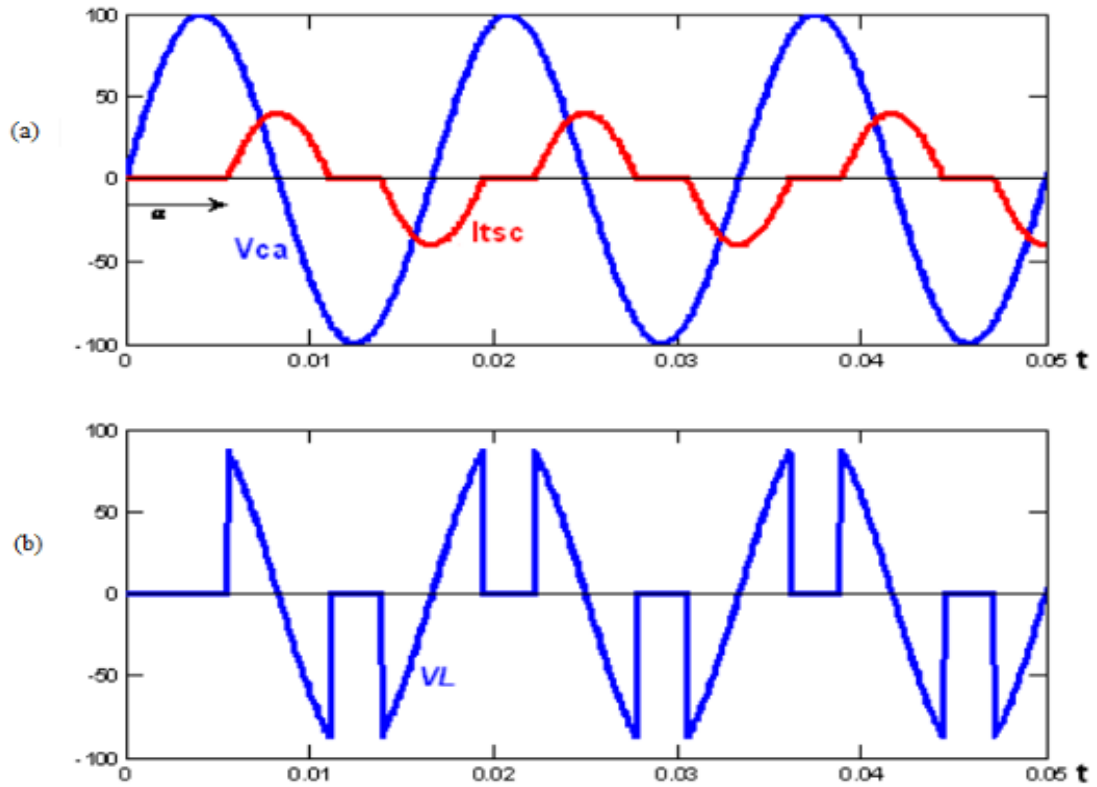
$$v_L = V \cdot \sin(\omega t) = L \cdot \frac{di_{TSR}}{dt} \quad (8)$$

A equação (9) representa a corrente i_{TCR} , que passa através do indutor, durante seu período de condução.

$$i_{TCR}(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} V \cdot \sin(\omega t) = \frac{V}{\omega L} [\cos \alpha - \cos(\omega t)] \quad (9)$$

A Figura 17 (a) apresenta a tensão da rede e a corrente no indutor, em azul e vermelho, respectivamente. Enquanto na Figura 17 (b) tem-se a forma de onda de corrente no TCR, que é pulsante e não senoidal.

Figura 17 - Forma de onda no (a) indutor e no (b) TCR.



Fonte: Silveira (2011)

Esta irregularidade na forma de onda da corrente, inerente à modulação de fase no TCR, provoca o aparecimento de um espectro harmônico cuja magnitude e composição dependem diretamente do ângulo de disparo α .

Aplicando-se a análise de Fourier à forma de onda da corrente do TCR, a componente fundamental (I_1), que corresponde à frequência da rede, pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$I_1(\alpha) = \frac{2\alpha}{\pi} - 2 - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \quad (10)$$

As amplitudes dos componentes harmônicos da corrente em função do ângulo α são expressas por:

$$I_n(\alpha) = \frac{4V}{\pi\omega L} \left[\frac{\sin[\alpha(n-1)]}{2(n-1)} + \frac{\sin[\alpha(n+1)]}{2(n+1)} - \frac{\cos(\alpha)\sin(n\alpha)}{n} \right] \quad (11)$$

A susceptância equivalente do TCR (B_{TCR}) em função do ângulo de disparo α , pode ser calculada substituindo-se (10) em (12), conforme equação (13).

$$I_{1(\alpha)} = VB_{TCR(\alpha)} \quad (12)$$

$$B_{TCR(\alpha)} = B_{max} \left[\frac{2\alpha}{\pi} - 2 - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right] \quad (13)$$

Onde $B_{max} = 1/(wL)$.

O valor máximo de susceptância ocorre quando o ângulo de disparo é 90° , e quando o ângulo é 180° , o valor da susceptância é 0.

3.1.3 Capacitor Chaveado a Tiristor -TSC

O controle do Capacitor Chaveado a Tiristor (TSC) é realizado mediante o chaveamento (conexão ou desconexão) de bancos de capacitores por meio de tiristores. Contudo, essa comutação gera o risco inerente de transitórios de corrente, que podem atingir valores significativamente elevados.

De fato, a análise da dinâmica do capacitor demonstra que a corrente de energização é diretamente proporcional à variação de tensão no momento do chaveamento. Conforme evidenciado pela equação (13) – que descreve o transiente –quanto maior for a diferença de potencial existente entre os terminais do banco de capacitores e a tensão da rede no instante da energização, maior será o pico de corrente resultante.

Portanto, a estratégia de controle do TSC deve ser cuidadosamente sincronizada para minimizar essa variação de tensão durante a comutação, garantindo a proteção dos tiristores e a estabilidade da qualidade da energia.

$$i_c(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (13)$$

Onde:

$i_c(t)$ é a corrente no banco de capacitores

C é a capacitância

$V_c(t)$ é a diferença de potencial nos terminais do capacitor

Para a operação segura e eficiente do TSC, a seleção do ângulo de disparo dos tiristores é crucial, visando minimizar os transitórios durante o chaveamento.

A técnica ideal de controle consiste em realizar o disparo dos tiristores quando a tensão na chave estiver próxima da tensão remanescente da carga prévia do capacitor. Dado que o tiristor cessa a condução somente no instante de extinção natural da corrente no capacitor (o que ocorre quando a tensão atinge seu valor máximo), a comutação deve ser sincronizada para esse pico de tensão. Essa sincronização precisa é fundamental não apenas para controlar a corrente de energização, mas também para reduzir significativamente o surgimento de distorção harmônica no TSC.

Adicionalmente, um reator limitador de corrente é frequentemente inserido no circuito do TSC. A função deste elemento é dupla:

1. Limitação de Transitórios: Atuar como um amortecedor para limitar possíveis surtos de corrente causados por uma eventual operação do banco fora da condição de chaveamento ideal.
2. Mitigação de Ressonância: Prevenir a excitação de possíveis ressonâncias no sistema.

Entre as dificuldades inerentes ao controle e operação dos bancos de capacitores chaveados, destacam-se:

- Elevados Transitórios de Tensão e Corrente: Ocorrendo no momento da conexão e desconexão dos capacitores.
- Excitação Harmônica: A possibilidade de excitação de correntes harmônicas devido a não-linearidades magnéticas (como a ferro-ressonância) ou a cargas não-lineares (como fornos a arco e fontes chaveadas).

3.2IMPLEMENTAÇÃO DOS COMPONENTES NO MATLAB

As modelagens e simulações deste trabalho foram realizadas no software MATLAB, a partir da integração do Simulink. O Simulink é uma ferramenta de programação para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos.

O Simulink permite a criação de modelos detalhados que representam um SVC, para o estudo da estabilidade do sistema elétrico, especialmente a estabilidade transitória, avaliando como o SVC responde a falhas ou perturbações na rede, bem como permite a simulação da resposta dinâmica a mudanças de tensão, como quedas ou aumentos, verificando seu impacto na estabilidade.

3.2.1 Dimensionamento do TCR

Para o dimensionamento do TCR, calculou-se a reatância total do TCR, utilizando a potência reativa trifásica e a tensão RMS no terminal do SVC, conforme equação (14).

$$Q_{LTCR} = \frac{3 \cdot V_{Fase}^2}{X_{LTCR}} \quad (14)$$

Sendo $V_{Fase} = V_{SVC} / \sqrt{3}$.

Substituindo a reatância total necessária para absorver Q_{Lmax} , valor absoluto da potência reativa indutiva máxima que o TCR deve absorver (no modo de condução total, $\alpha = 90^\circ$) é:

$$X_{LTCR} = \frac{V_{SVC}^2}{Q_{Lmax}} \quad (15)$$

Desse modo, conhecendo X_L , a indutância L é calculada utilizando a frequência nominal:

$$L_{TCR} = \frac{X_{LTCR}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (16)$$

3.2.2 Dimensionamento do TSC

De modo análogo, o dimensionamento do TSC é baseado na potência reativa capacitiva que o SVC deve injetar. Para isto, calcula-se a reatância total do TSC, a partir da potência reativa capacitiva trifásica e a tensão RMS no terminal do SVC.

$$Q_{CTSC} = \frac{3 \cdot V_{Fase}^2}{X_{CTSC}} \quad (17)$$

A reatância total necessária para injetar Q_{Cmax} é dada por:

$$X_{CTSC} = \frac{V_{SVC}^2}{Q_{CTmax}} \quad (18)$$

Devido este projeto ter 2 bancos de capacitores iguais, Q_{Cmax} deve ser a soma das potências de todos os bancos. Desse modo, a capacitância pode ser calculada por:

$$X_{CTSC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{TSC}} \quad (19)$$

$$C_{TSC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{CTSC}} \quad (20)$$

Caso o projeto tenha N bancos de TSCs idênticos, a capacitância de cada banco será:

$$C_{TSC_Banco} = \frac{C_{TSC_Total}}{N} \quad (21)$$

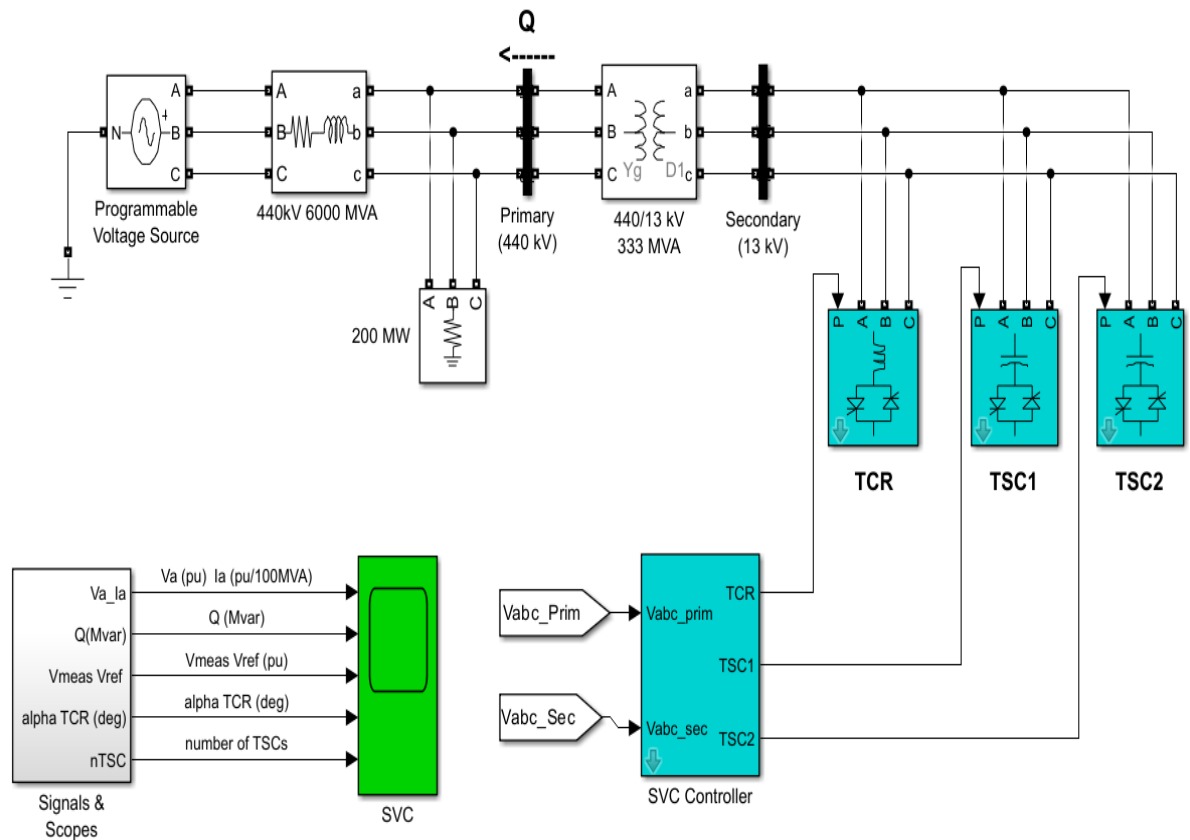
A equalização de tensão no chaveamento dos Capacitores Chaveados a Tiristor (TSCs) é uma estratégia de controle crítica, fundamental para a proteção dos tiristores e para a estabilidade do sistema elétrico. A dinâmica do capacitor exige que a corrente de energização seja diretamente proporcional à variação de tensão (diferença de potencial) presente no momento da comutação. Se houver uma grande diferença de potencial entre a tensão da rede e a tensão remanescente do capacitor no instante do chaveamento, ocorrerá um pico de corrente transitória elevado, que pode causar danos aos componentes e gerar distúrbios de qualidade de energia.

3.2.3 Modelagem do SVC

O diagrama para o modelo do SVC no MATLAB/Simulink é apresentado pela Figura 18, onde o TCR e TSC são conectados em paralelo à barra a partir de um transformador abaixador. O SVC foi dividido entre sistema de potência e sistema de controle.

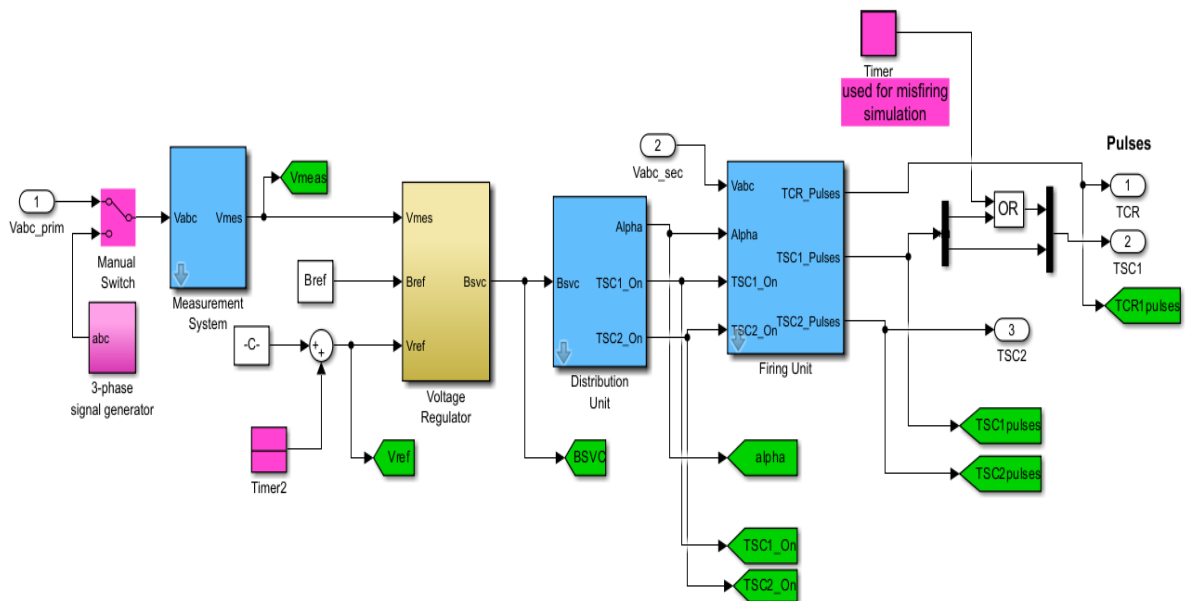
O sistema de potência, mostrado pela Figura 18, é constituído por um transformador abaixador, um TCR e dois TSCs.

Figura 18 - Diagrama do SVC no Simulink



Fonte: Adaptado de Giroux, P.; Sybille, G.

Figura 19 - Diagrama de controle do SVC



Fonte: Adaptado de Giroux, P.; Sybille, G.

O diagrama apresentado pela Figura 19 sintetiza a arquitetura de controle de um Compensador Estático de Var (SVC), que opera em uma malha de *feedback* fechada

para regular a potência reativa e, conseqüentemente, manter a tensão do barramento dentro de um valor de referência preestabelecido. A lógica de operação é baseada em uma sequência hierárquica, desde a medição do sistema até a geração dos pulsos de disparo dos tiristores.

O Subsistema de Entrada e Medição é responsável pela aquisição de dados e sincronização com a rede:

- Tensão de Entrada ($V_{abc_{prim}}$): O ponto de partida é a tensão trifásica real do barramento primário.
- Chave Manual (*Manual Switch*): Permite a alternância entre a tensão da rede e um gerador de sinais de teste. Essa funcionalidade é crucial para testes de desempenho em malha aberta e para a verificação da resposta do sistema sob condições controladas de simulação.
- Sistema de Medição (*Measurement System*): Este bloco processa a tensão trifásica e fornece a saída vital: a Tensão Medida (V_{meas}), normalizada em pu. Ele também pode fornecer a Susceptância de Referência (B_{ref}) para aplicações específicas de controle de malha aberta.

O Regulador de Tensão é o centro do controle em malha fechada do SVC:

- Princípio de Funcionamento: Compara a Tensão Medida (V_{meas}) com a Tensão de Referência (V_{ref}) e utiliza um algoritmo de controle (tipicamente Proporcional-Integral — P.I.) para calcular o desvio e gerar o comando de correção.
- Saída (B_{SVC}): A saída é a Susceptância Total Requerida (B_{SVC}). Este sinal representa a susceptância total que o SVC deve fornecer (seja injetando capacitivamente ou absorvendo indutivamente) para anular o erro de tensão.

A Unidade de Distribuição atua como o gerenciador de estratégia, traduzindo o comando de susceptância total em ações de controle para os componentes de potência:

- Alocação de Susceptância: Recebe B_{SVC} e o aloca de forma otimizada entre o controle contínuo e o controle discreto.
- Saídas de Controle:
 - Ângulo α : O comando contínuo, enviado aos TCR para modular a susceptância indutiva.

- Sinais Binários (TSC1_On, TSC2_On): Os comandos discretos de (liga/desliga) que ativam ou desativam os bancos de capacitores, fornecendo passos de susceptância capacitiva.

A Unidade de Disparo é o elo final de execução, responsável por sincronizar o controle com a física da rede:

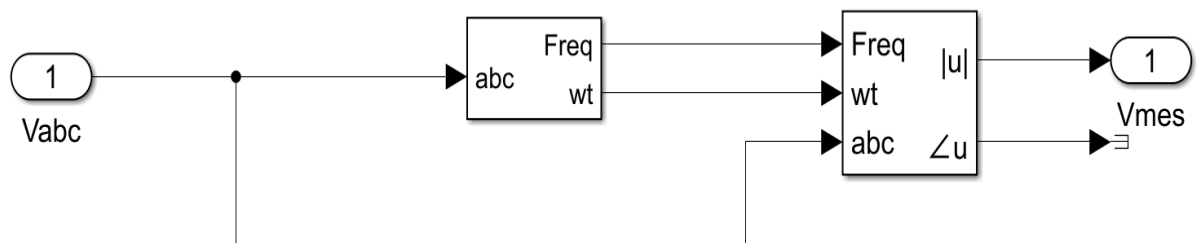
- Sincronismo: Utiliza a tensão do lado secundário do transformador ($V_{abc_{sec}}$) para garantir que os pulsos sejam emitidos no momento exato em relação à fase da rede.
- Geração de Pulso: Converte o ângulo α e os sinais binários On em pulsos de *gate* para os respectivos ramos de tiristores (TCR e TSCs). A precisão deste subsistema é vital para a operação eficiente e a proteção dos componentes contra picos de corrente e sobretensão.

O restante do diagrama é dedicado à análise e validação do modelo:

- Saídas de Pulso: As saídas separadas para TCR, TSC1 etc., permitem a medição direta da atuação de cada ramo. O bloco OR combina esses pulsos para uma visualização simplificada (*Pulses*).
- Temporizadores de Teste: O diagrama inclui *Timers* específicos para a simulação de falhas (*misfiring simulation*) e para a avaliação da constante de tempo em malha aberta. Estes recursos são inestimáveis para testar a robustez e a dinâmica do SVC em condições anormais e para sintonizar os ganhos do controlador.

Essa arquitetura integrada permite que o SVC realize uma compensação de potência reativa contínua e precisa, garantindo a estabilidade da tensão e contribuindo significativamente para a Qualidade da Energia do sistema elétrico.

Figura 20 - Sistema de medição



Fonte: Adaptado de Giroux, P.; Sybille, G.

O subsistema de medição de tensão é a porta de entrada sensorial do Compensador Estático de Reativos (SVC), fornecendo ao controlador as informações em tempo real sobre o estado da rede. Sua funcionalidade essencial é capturar a tensão na barra onde o SVC está conectado e processá-la em uma forma útil e sincronizada para o controle.

O processo inicia no Bloco de Entrada V_{abc} , que capta o sinal de tensão trifásica medido diretamente na barra de acoplamento do SVC. Este sinal, expresso em volts, é a representação primária da condição elétrica do sistema que o compensador precisa monitorar e corrigir.

O Conversor de Coordenadas é o elemento de sincronização do subsistema, atuando essencialmente como um *Phase-Locked Loop* (PLL). O PLL se trata de um sistema de controle cuja finalidade é gerar um sinal de saída com frequência e fase instantâneas sincronizadas ao sinal de entrada que está sendo amostrado. Ao assegurar que a frequência de saída se mantenha igual à de entrada em regime permanente, esse sistema adquire a capacidade de rastrear a frequência do sinal amostrado, além de poder gerar frequências múltiplas desse sinal de entrada.

Sua função primordial é rastrear a frequência e o ângulo de fase do sinal de entrada da rede elétrica para garantir que todo o controle subsequente esteja perfeitamente sincronizado. Isso é obtido pela conversão da tensão trifásica para um sistema de referência síncrono.

As saídas críticas deste bloco são:

- Frequência (Freq): A frequência fundamental do sistema em Hertz (Hz).
- Posição Angular (ωt): O ângulo de fase instantâneo do vetor de tensão em radianos, obtido através da integração da frequência angular.
- Sinal Trifásico Refinado (abc): O próprio sinal de tensão após o processamento PLL.

Em termos práticos, este bloco funciona como o sincronizador mestre, fornecendo a base temporal e posicional para que o controlador do SVC saiba a posição exata do vetor de tensão da rede em qualquer instante.

Este bloco recebe as informações sincronizadas do PLL e as utiliza para calcular as características vetoriais da tensão da barra. Sua função central é traduzir o sinal trifásico bruto em duas métricas cruciais:

- Magnitude ($|u|$): Calcula o valor eficaz (*Root Mean Square* - RMS) da tensão, que representa o nível de tensão real na barra.

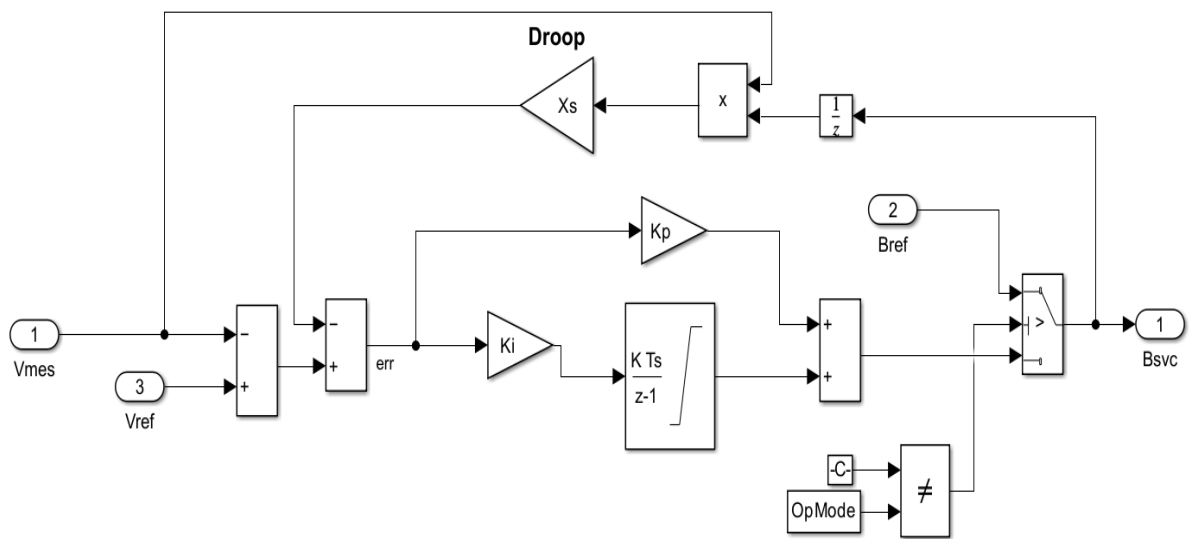
- Ângulo ($\angle$): Determina o ângulo de fase do vetor de tensão.

A Saída Principal deste bloco é a magnitude ($|u|$), que é designada como a Tensão Medida (V_{meas}).

O sinal V_{meas} é a saída final e mais importante do subsistema de medição. Representando a tensão da barra calculada e validada, este sinal é então enviado diretamente para o Regulador de Tensão do SVC.

Em suma, o subsistema de medição é a inteligência de percepção do SVC. Ele opera capturando a tensão da barra, sincronizando-a com a frequência da rede através do PLL, e, por fim, extraindo a magnitude de tensão. É essa tensão medida que, ao ser comparada com a tensão de referência, aciona o circuito de controle para injetar ou absorver potência reativa, garantindo a qualidade e estabilidade da tensão na rede.

Figura 21 - Diagrama do regulador de tensão



Fonte: Adaptado de Giroux, P.; Sybille, G.

O Regulador de Tensão atua como o núcleo de decisão e controle do Compensador Estático de Reativos (SVC). Sua responsabilidade fundamental é garantir que a tensão no barramento de acoplamento do SVC seja mantida rigorosamente dentro dos limites operacionais desejados, ajustando dinamicamente a potência reativa trocada com o sistema.

O regulador depende de dois sinais de entrada essenciais para iniciar seu algoritmo de correção:

- Tensão Medida: Este sinal, proveniente do subsistema de medição, representa o *feedback* em tempo real da tensão atual da barra. É o valor que o regulador deve corrigir.
- Tensão de Referência: Define o valor nominal ou o ponto de ajuste (*setpoint*) ideal de tensão que se deseja manter no sistema (tipicamente 1.0 p.u. ou um valor ligeiramente superior).

A passagem do erro de tensão para o comando de susceptância (B_{SVC}) é um processo de controle sofisticado, detalhado a seguir:

A primeira etapa crítica envolve o cálculo do erro de tensão (err), dado pela diferença entre a Tensão Medida e a Tensão de Referência ($err = V_{meas} - V_{ref}$). A missão do regulador, a partir deste ponto, é implementar uma ação de controle que minimize e, idealmente, zere este erro.

O sinal de erro alimenta o Controlador P-I, um algoritmo escolhido por sua robustez e eficácia na eliminação de erros.

- Ação Proporcional ($K_p = 0$): Garante uma resposta imediata e proporcional ao erro instantâneo. Um erro grande gera um comando de correção grande, conferindo rapidez à resposta dinâmica do SVC.
- Ação Integral ($K_i = 800$): Atua sobre o erro acumulado ao longo do tempo, conforme ilustrado pelo bloco $\frac{K \cdot T_s}{z-1}$ (representação discreta). Esta ação é crucial para eliminar o erro em regime permanente, assegurando que a tensão se assente exatamente no valor de referência desejado.

O bloco *Droop* adiciona uma característica de regulação estática ao SVC. Ao introduzir uma pequena variação na tensão de referência em função da potência reativa injetada ou absorvida, o *Droop* (definido pela inclinação X_s em p.u.) permite:

- Compartilhamento de Carga: Distribuir a exigência de potência reativa de forma coordenada entre múltiplos compensadores conectados a barramentos adjacentes.
- Estabilidade: Contribuir para a estabilidade global do sistema, evitando que o SVC tente manter a tensão rigidamente em 1.0 p.u. a todo custo.

A combinação e saturação das ações Proporcional, Integral e Droop resultam no sinal de saída, a Susceptância Requerida (B_{SVC}). Este sinal é a instrução de controle final que o regulador envia ao próximo subsistema, o Controlador de Disparo (Firing Controller). O B_{SVC} comanda a susceptância indutiva (TCR) e/ou capacitiva (TSC)

necessária para injetar ou absorver a potência reativa correta e, assim, restaurar o nível de tensão da barra.

A contra-interação entre o Capacitor Chaveado a Tiristor (TSC) e o Reator Controlado a Tiristor (TCR) é executada de forma a garantir uma transição de susceptância suave e contínua, minimizando grandes oscilações de tensão ou picos de corrente na rede.

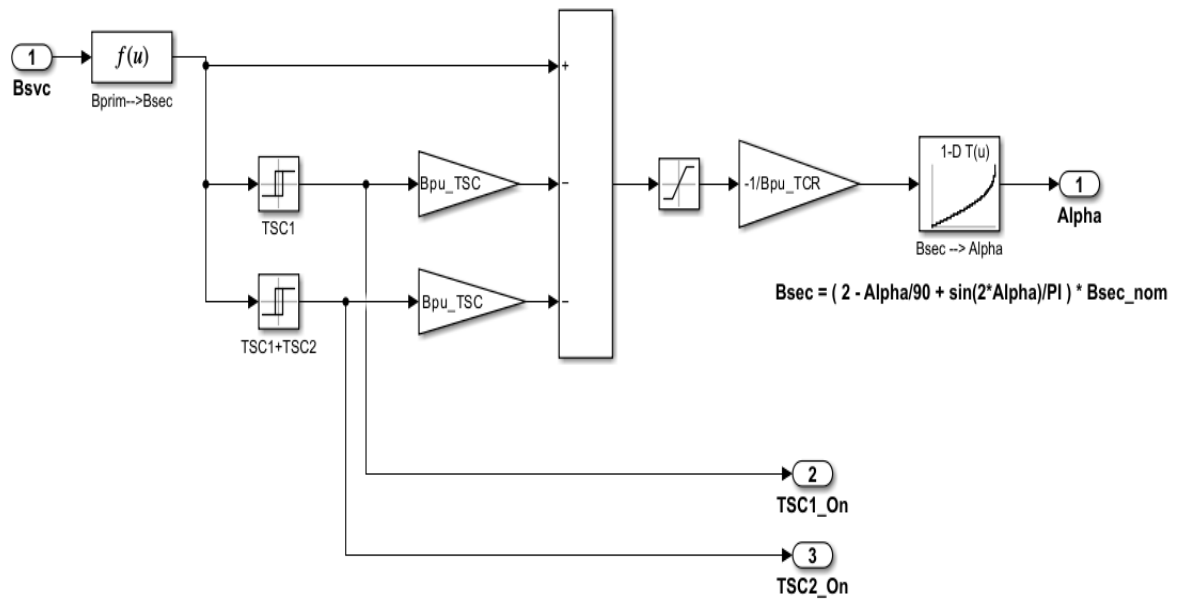
Essa suavidade é fundamentalmente alcançada pela coordenação de controle que utiliza o TCR como um elemento de ajuste fino e amortecimento para compensar a natureza discreta do TSC. O sistema de controle, ao determinar a susceptância total requerida (B_{SVC}), distribui esse valor entre a contribuição discreta do TSC (B_{TSC}) e a contribuição contínua do TCR ($B_{TCR(\alpha)}$). Quando uma mudança de tensão no sistema exige o chaveamento de um banco de TSC (o que, isoladamente, causaria um degrau abrupto de potência reativa), o controle aplica uma técnica de *blending* ou transição coordenada.

O controle do TCR é ajustado antes do chaveamento do TSC. O TCR absorve (ou injeta) temporariamente uma quantidade de potência reativa que é quase igual e oposta ao salto de potência reativa que será causado pela entrada ou saída do TSC. Por exemplo, se for necessário ligar um banco de TSC (para injetar $+Q_{TSC}$), o ângulo de disparo (α) do TCR é rapidamente ajustado para que ele absorva instantaneamente uma potência $-Q_{TCR} \approx -Q_{TSC}$.

O TSC é então chaveado (no ponto de zero tensão para evitar picos de corrente internos). O efeito líquido na rede, resultante da soma do TSC ligado (injeção) e do TCR ajustado (absorção), é um salto de potência reativa muito pequeno, resultando em uma transição suave da susceptância total.

Após o chaveamento do TSC (que estabeleceu o novo patamar discreto de reativos), o controle do TCR é gradualmente liberado para retomar sua função de ajuste fino, ajustando seu ângulo α para o valor requerido pela nova condição de tensão do sistema. Essa coordenação garante que a susceptância total do SVC vista pela rede evolua continuamente, prevenindo a excitação de oscilações indesejadas.

Figura 22 - Diagrama da unidade de distribuição



Fonte: Adaptado de Giroux, P.; Sybille, G.

A Unidade de Distribuição atua como a lógica de coordenação central do SVC. Seu papel é receber o comando de susceptância total (B_{SVC}) calculado pelo regulador de tensão e traduzi-lo em comandos de operação específicos para os elementos de potência do compensador: os capacitores chaveados a tiristor e os reatores controlados a tiristor. Essa tradução garante que a quantidade exata de potência reativa seja injetada ou absorvida pela rede.

Sinais de Interface:

- Entrada: B_{SVC} (Susceptância Total) – O comando de susceptância necessário, calculado pelo regulador de tensão em p.u.
- Saídas:
 - α (Ângulo de Disparo): O ângulo que define o nível de condução do TCR.
 - TSC1_On e TSC2_On: Sinais binários de comutação que ligam ou desligam os bancos de capacitores.

Inicialmente, o bloco de conversão $f(u)$ ajusta o sinal de susceptância B_{SVC} da barra primária (B_{prim}) para a barra secundária (B_{sec}). Essa etapa garante que os comandos de susceptância estejam corretamente escalonados e referenciados ao nível de tensão dos componentes internos do SVC.

A lógica de chaveamento dos TSCs utiliza comparadores com histerese para garantir a estabilidade do sistema.

- **Motivação:** Como os capacitores operam em modo discreto (ligado ou desligado), uma comutação simples resultaria em "chattering" – oscilações rápidas de liga/desliga – na vizinhança do ponto de referência, o que é prejudicial aos tiristores e à estabilidade da rede.
- **Mecanismo:** A histerese cria uma "zona morta" ou banda de tolerância (utilizando um diferencial entre os pontos de ligar e desligar). O TSC só é ativado quando a susceptância B_{sec} atinge um limite superior ($0 + B_{pu_{TSC}}$) e só é desativado quando cai abaixo de um limite inferior (e.g., $-1 \cdot hyst_{svc} + B_{pu_{TSC}}$). Isso confere robustez ao controle e limita o número de operações dos TSCs.

O TCR atua como o refinador do controle. Seu papel é preencher a lacuna reativa que os TSCs – por serem discretos – não conseguem suprir integralmente.

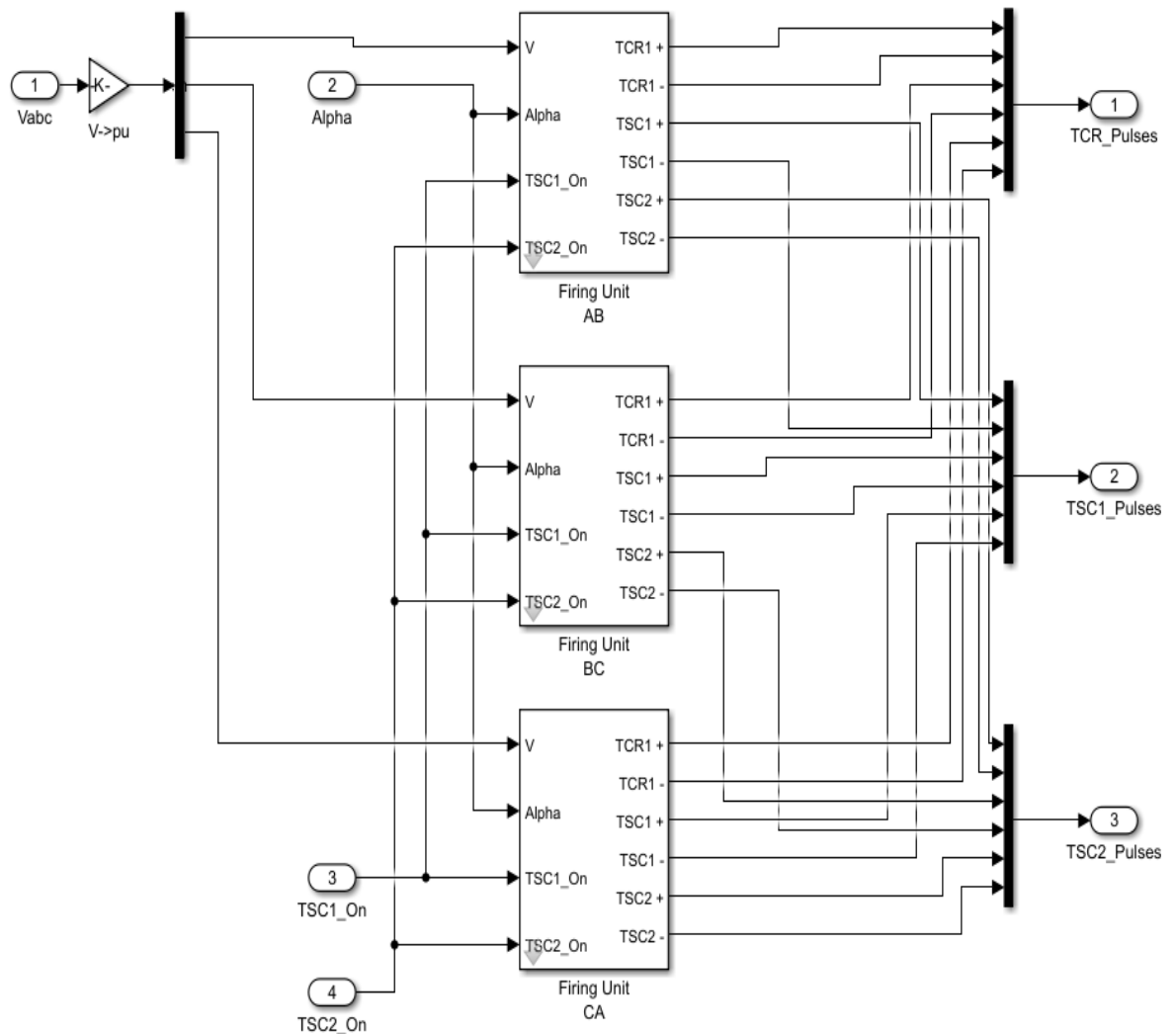
- **Cálculo da Susceptância do TCR:** A susceptância total requerida (B_{sec}) é reduzida pela susceptância que está sendo fornecida pelos TSCs ligados. O resultado é a susceptância exata que o TCR deve prover (sendo indutiva ou capacitiva, dependendo da necessidade).
- **Limitação Operacional:** O bloco de saturação garante que a susceptância do TCR seja mantida estritamente dentro de seus limites de projeto ($\frac{1}{B_{pu_{TCR}}}$), protegendo o componente contra sobrecargas.
- **Geração do Ângulo α :** O bloco $1 - D \cdot T(u)$ converte a susceptância requerida para o TCR no ângulo de disparo correspondente. Esta conversão é baseada na relação fundamental que descreve a susceptância do TCR como uma função do alpha:

$$B_{TCR} = B_{max} \left[\frac{2\alpha}{\pi} - 2 - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right] \quad (13)$$

O alpha gerado é a saída final enviada à unidade de disparo para gerar os pulsos de comando dos tiristores do TCR.

Em suma, a Unidade de Distribuição gerencia de forma inteligente a transição entre o controle discreto (TSCs) e o controle contínuo (TCR), utilizando o princípio de histerese para a estabilidade e garantindo que o comando de susceptância do regulador de tensão seja traduzido com precisão e segurança para a rede.

Figura 23 - Unidade de disparo



Fonte: Adaptado de Giroux, P.; Sybille, G.

A Unidade de Disparo (*Firing Unit*) é o componente final e mais crítico da cadeia de controle do Compensador Estático de Var (SVC). Sua função primordial é traduzir as instruções de controle da Unidade de Distribuição em pulsos de *gate* precisos e temporizados para os tiristores dos Reatores Controlados a Tiristor e dos Capacitores Chaveados a Tiristor, garantindo uma operação segura, eficiente e sincronizada com a rede elétrica.

Conforme ilustrado no diagrama, a arquitetura é tripla, com unidades de disparo separadas para cada fase do sistema trifásico (AB, BC e CA), embora a lógica interna seja idêntica para cada uma.

A precisão da Unidade de Disparo depende de entradas sincronizadas:

- Sinais de Tensão (V): A tensão trifásica (V_{ABC}) do barramento, utilizada para o sincronismo de fase (geralmente via PLL), define o instante zero de cada ciclo.

- Comando Contínuo (*alpha*): O Ângulo de Disparo em graus, que é o comando modulatório para o TCR.
- Comandos Discretos (TSC1_On, TSC2_On): Sinais binários (0 ou 1) que habilitam o chaveamento dos bancos de TSCs.

A Unidade de Disparo para o TCR é responsável pela modulação contínua da reatância indutiva:

- Conversão alpha para Tempo: O subsistema converte o ângulo alpha em uma posição de tempo discreta (um número de amostras), utilizando informações como o Ns/c (número de amostras por ciclo).
- Emissão de Pulso: O TCR Pulse Generator utiliza a contagem de tempo, referenciada a sinais de sincronismo, para gerar o pulso de *gate* com a precisão de um ciclo de amostragem no instante exato definido pelo alpha.
- Simetria: A lógica garante o disparo simétrico dos tiristores de cada fase, essencial para que o TCR opere sem injetar componentes de corrente contínua na rede.

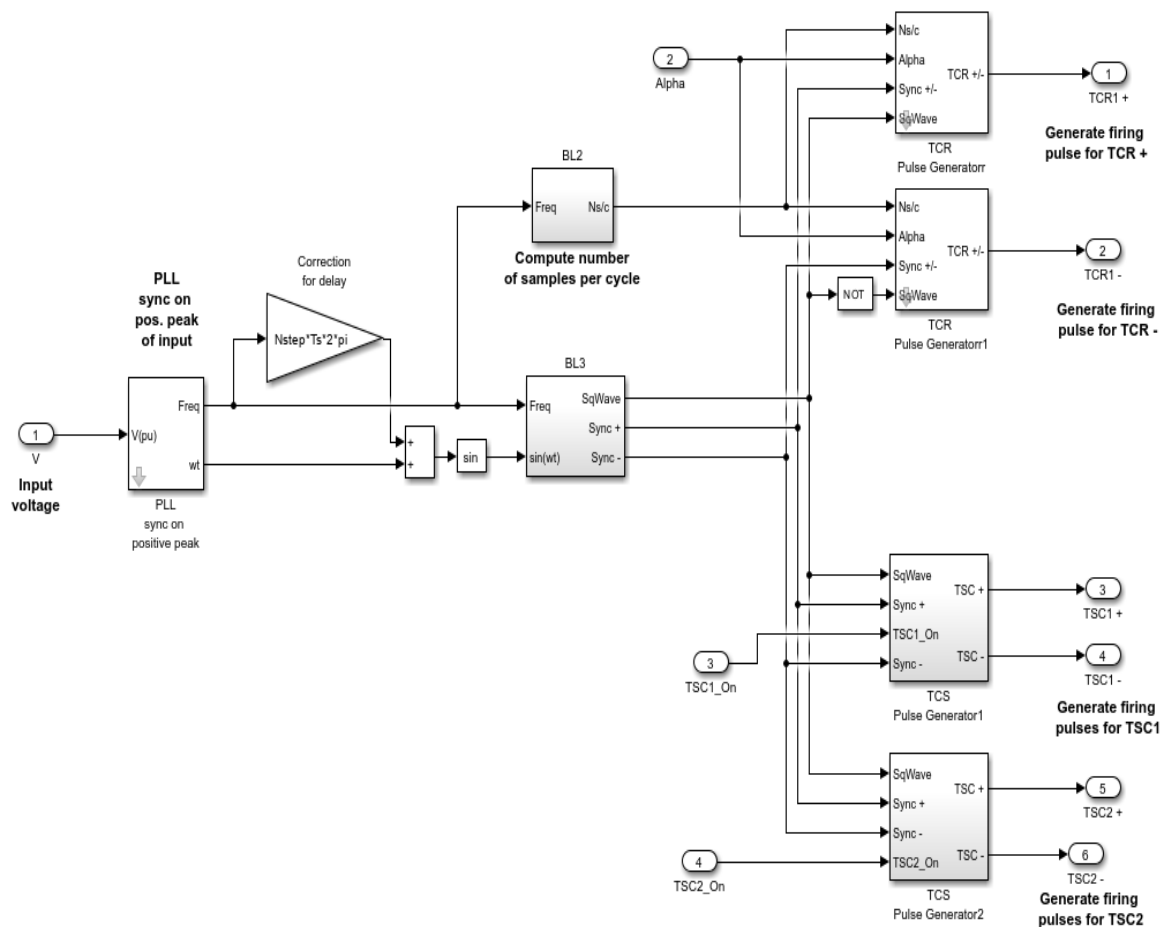
A Unidade de Disparo para o TSC é responsável pela comutação segura dos bancos de capacitores:

- Chaveamento Sincronizado: O pulso é gerado apenas quando o sinal de habilitação (TSC_On) está ativo e a tensão na chave é nula, o que corresponde ao pico de tensão da rede.
- Proteção contra Transitórios: Esta técnica de chaveamento no pico de tensão é uma medida de proteção fundamental, pois minimiza a ΔV (variação de tensão) e, conseqüentemente, reduz drasticamente o risco de correntes transitórias (*inrush currents*) elevadas, protegendo os tiristores e a qualidade da energia.

O resultado do subsistema são os pulsos de *gate* separados: TCR_Pulses, TSC1_Pulses, e TSC2_Pulses. Esses pulsos são aplicados diretamente aos tiristores de potência, ativando o TCR para absorver reativos e os TSCs para injetar reativos, mantendo o controle dinâmico da tensão do barramento.

Em suma, a Unidade de Disparo é o mecanismo de execução temporal que traduz a estratégia de controle em ações eletrofísicas seguras e precisas, permitindo que o SVC cumpra sua função essencial de estabilização do sistema de potência.

Figura 24 - Sub-bloco da unidade de disparo



Fonte: Adaptado de Giroux, P.; Sybille, G.

A Unidade de Disparo (*Firing Unit*) é o subsistema de controle de baixo nível do SVC, responsável por traduzir as instruções do regulador em pulsos de *gate* sincronizados para os tiristores. Sua precisão é vital para o desempenho, a segurança operacional e a eliminação de harmônicos no sistema.

A base da operação é o sincronismo preciso com a rede, garantido pelo *Phase-Locked Loop* (PLL):

- **Entrada e Sincronismo (PLL):** O PLL rastreia a Tensão de Entrada (*Input Voltage*) da rede. Ao "travar" no pico positivo da onda, ele estabelece a referência de fase.
- **Geração de Sinais de Tempo:** O PLL gera a Frequência (Freq) e a posição angular (wt) do sistema. A partir do wt, a lógica interna gera uma Onda Quadrada Sincronizada (*SqWave*) e os pulsos estreitos (*Sync*), que definem os instantes exatos para o chaveamento. O bloco *Compute number of samples per cycle* utiliza estas informações para gerar Ns/c, um parâmetro digital crucial para a temporização precisa dos pulsos em ambientes de simulação discreta.

O controle dos TCRs implementa a compensação contínua através da modulação de fase:

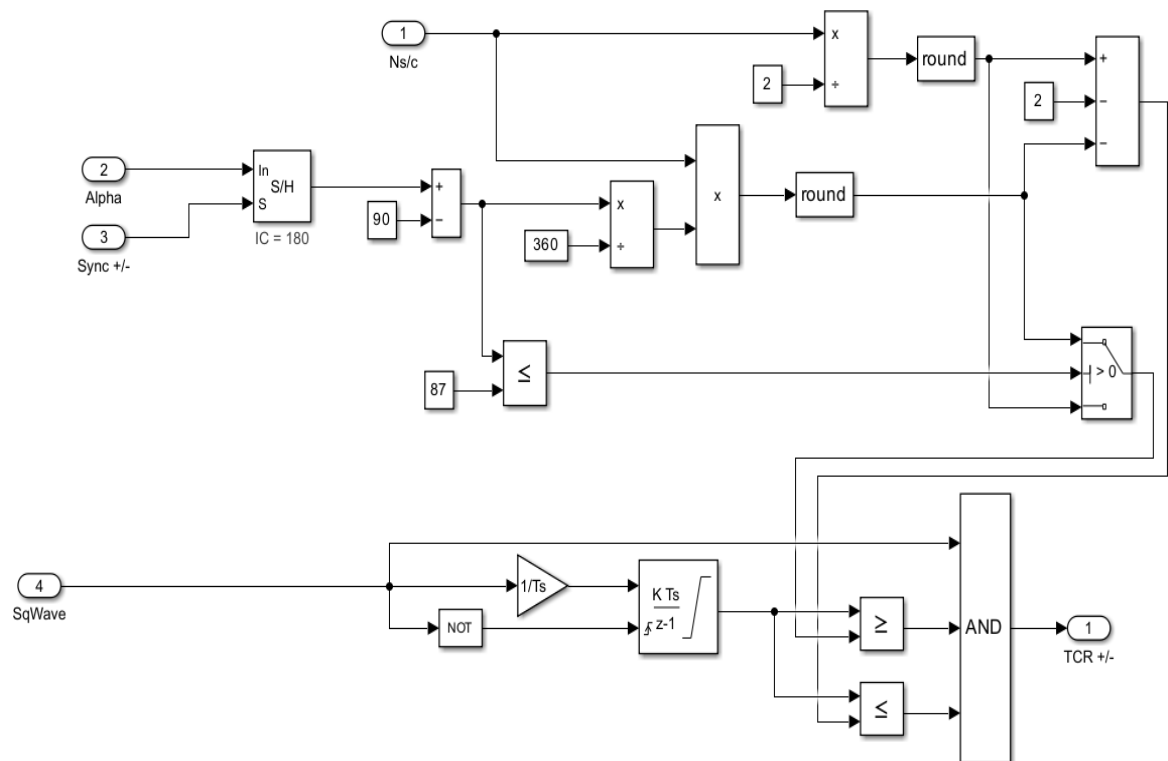
- Comando Angular (*alpha*): O Ângulo de Disparo (*alpha*), principal variável de controle do TCR, determina a reatância indutiva que será absorvida.
- Geração de Pulso: A lógica do TCR *Pulse Generator* converte *alpha* em um instante de tempo. Para assegurar uma operação simétrica, o gerador de pulso do TCR negativo recebe o comando *alpha* invertido (através de um bloco NOT), garantindo que o disparo seja idêntico na metade negativa e minimizando a injeção de componente DC (corrente contínua) na linha.
- Saídas: Os pulsos de *gate* (*Generate firing pulse for TCR*) são o resultado, permitindo a modulação da potência reativa indutiva.

O controle dos TSCs implementa a compensação em passos discretos (ligado/desligado):

- Sinais de Habilitação: As entradas digitais (TSC1_On, TSC2_On) são os sinais de controle principais que habilitam o chaveamento dos bancos.
- Sincronismo de Chaveamento: Os TSC *Pulse Generators* utilizam os mesmos sinais de sincronismo (*SqWave*, *Sync*) para garantir que a conexão dos capacitores ocorra no pico de tensão. Esta é uma medida de segurança fundamental que minimiza a tensão sobre o tiristor no instante da comutação, evitando picos de corrente (*inrush current*) e protegendo o equipamento.
- Saídas: Os pulsos gerados (*Generate firing pulses for TSC*) acionam os tiristores dos bancos, injetando potência reativa capacitiva em passos definidos.

O diagrama ilustra a sinergia entre as duas formas de controle do SVC: o TCR oferece a ação contínua e rápida necessária para o controle fino da tensão através da modulação do *alpha*; os TSCs fornecem o grosso da potência reativa capacitiva em passos discretos. A coordenação precisa entre os geradores de pulso e o PLL garante que essa compensação seja executada de forma sincronizada, segura e eficiente, cumprindo o papel do SVC na estabilização do sistema elétrico.

Figura 25 - Gerador de Pulso do TCR



Fonte: Adaptado de Giroux, P.; Sybille, G.

O Gerador de Pulso do Reator Controlado a Tiristor (TCR) é o subsistema crítico responsável pela execução da modulação contínua de potência reativa. Ele atua como o tradutor digital-analógico do controle, convertendo o comando angular (*alpha*) em um pulso de *gate* emitido com precisão de amostragem.

O subsistema recebe o Ângulo de Disparo (*alpha*), calculado pela Unidade de Distribuição, e utiliza a lógica de *timing* para determinar o instante exato em que o tiristor deve ser acionado dentro do meio-ciclo.

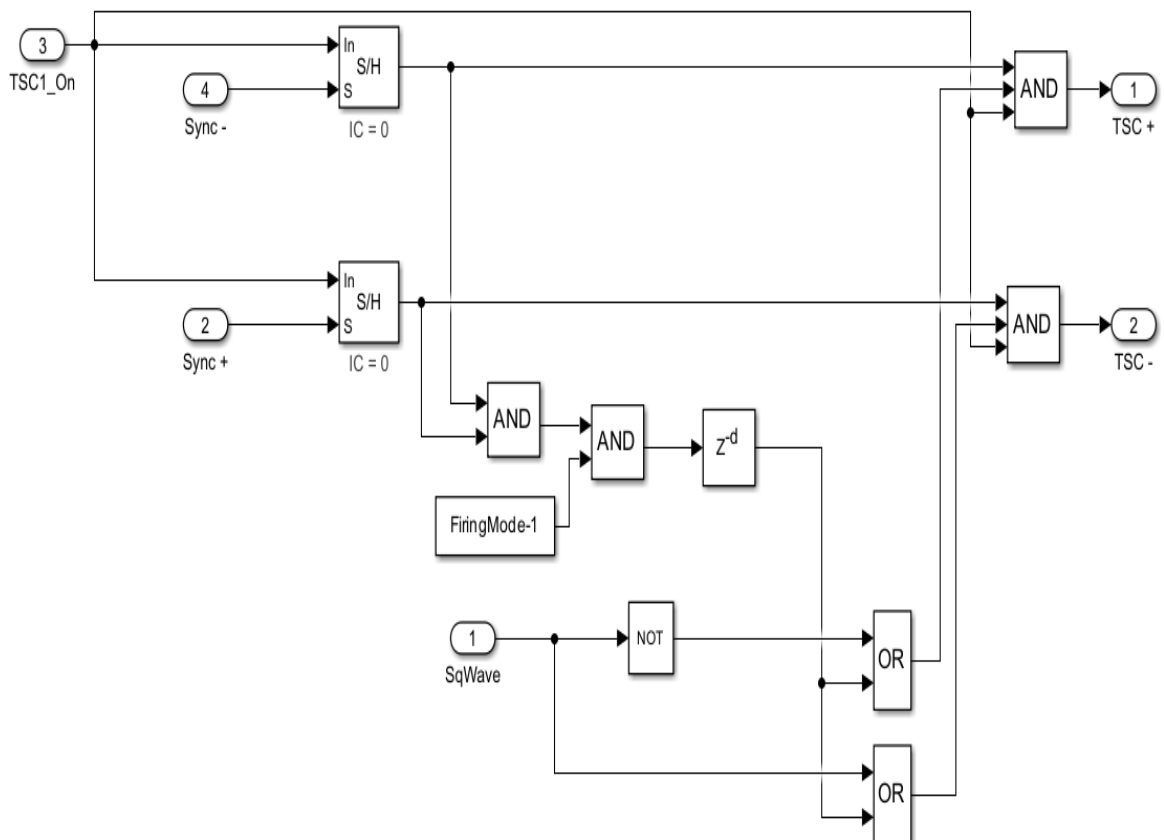
Entradas de Sincronismo Essenciais:

- Ns/c (Número de Amostras por Ciclo): Fundamental para converter a variável contínua (ângulo) em um índice discreto (número da amostra).
- Sync: Define o ponto de referência angular (geralmente 180° ou 0° da tensão no tiristor) para iniciar a contagem do *alpha*.

O processo interno é uma sequência rigorosa de sincronização digital e contagem:

- Ajuste Angular: O valor de *alpha* é ajustado (tipicamente pela subtração de 90° e inicialização do contador a 180°) para refletir a fase de condução real dos tiristores em relação ao ponto de sincronismo da rede.

Figura 26 - Gerador de Pulso para o TSC



O Gerador de Pulso para o Capacitor Chaveado a Tiristor (TSC) é um subsistema de controle binário, cuja simplicidade de lógica contrasta com a

complexidade do TCR, pois a operação do capacitor é estritamente discreta (chaveado ou não-chaveado). Sua função primária é traduzir o comando digital da Unidade de Distribuição em pulsos de *gate* para ligar ou desligar os tiristores, garantindo que o chaveamento ocorra no momento ideal para o sistema.

O funcionamento do gerador de pulso do TSC depende da sincronia com o sistema e do comando de controle:

- Comando de Ativação (TSC_On): O sinal de controle digital (0 ou 1) emitido pela Unidade de Distribuição, indicando a necessidade de ligar o banco de capacitores.
- Sinais de Sincronismo (*Sync* e *SqWave*): Estes sinais definem a referência de tempo e fase da tensão da rede.

A chave para o controle do TSC é o chaveamento em tensão zero através do capacitor, o que, na prática, corresponde ao pico de tensão da rede. O objetivo é evitar grandes correntes transitórias de energização que poderiam danificar os tiristores e gerar distúrbios na rede.

A lógica emprega um bloco Amostragem Sincronizada (S/H – *Sample and Hold*) ativado pelos sinais de sincronismo (*Sync*). Essa etapa é vital para garantir que o comando de chaveamento (TSC_On) seja amostrado e considerado apenas nos instantes adequados para o disparo do tiristor.

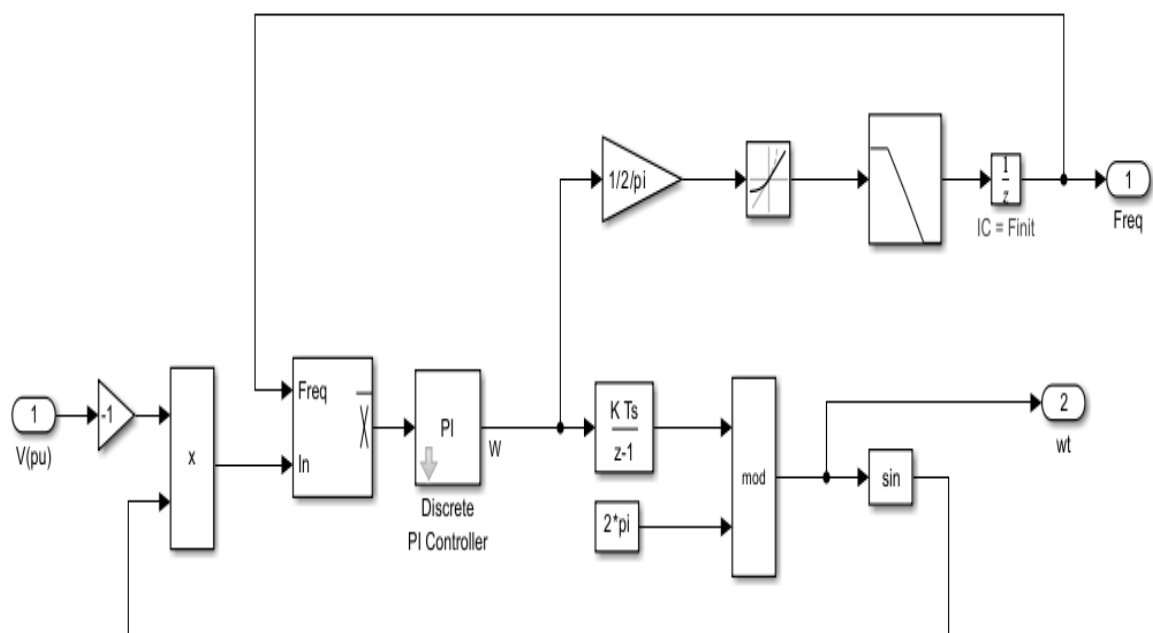
O circuito utiliza uma combinação de portas lógicas (AND, OR e NOT) que integram a Onda Quadrada (*SqWave*) com os sinais de sincronismo e o comando TSC_On. Essa lógica complexa é projetada para implementar o modo de disparo (geralmente *FiringMode-1*), que define o seguinte comportamento, crucial para a longevidade do equipamento:

A literatura de FACTS e o próprio diagrama indicam que o TSC é tipicamente ligado quando a tensão na linha de transmissão atinge seu pico (pico positivo para o tiristor negativo e vice-versa). Isso minimiza o $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ no capacitor, evitando o transiente de corrente. A inversão dos sinais de *Sync* na lógica interna confirma essa estratégia de chaveamento no pico de tensão.

O resultado da lógica são os pulsos de *gate* (TSC+ e TSC-), enviados aos tiristores positivo e negativo, ativando o banco de capacitores somente quando a condição de ligado (TSC_On = 1) é satisfeita e a sincronização para comutação segura é atingida.

É correto notar que a lógica interna do Gerador de Pulso para o TSC_2 é análoga à do TSC_1. Em um modelo de SVC com múltiplos bancos, cada TSC requer um subsistema de disparo idêntico, pois a física do chaveamento tiristorizado de um capacitor não muda. A única distinção operacional reside nas entradas de controle digital (TSC1_On, TSC2_On etc.), que são sinais independentes emitidos pela Unidade de Distribuição para modular a quantidade total de susceptância capacitiva injetada.

Figura 27- Diagrama do Phase-Locked Loop



Fonte: Adaptado de Giroux, P.; Sybille, G.

O *Phase-Locked Loop* (PLL) monofásico em ambiente discreto constitui o subsistema de sincronismo fundamental do Compensador Estático de Reativos (SVC). Seu propósito é rastrear e replicar, com alta precisão, a fase (ωt) e a frequência (Freq) da tensão da rede (V_{in}), fornecendo referências temporais essenciais para o controle de disparo dos tiristores.

O PLL funciona como um robusto sistema de *feedback*, dividido em três estágios principais:

O processo inicia com a comparação entre a tensão da rede e o sinal do oscilador interno, gerando o sinal de erro:

- Tensão de Entrada (V_{pu}): O sinal de tensão é primeiramente invertido (multiplicado por -1).

- **Detector de Fase (Multiplicador):** A tensão de entrada invertida é multiplicada pelo sinal senoidal ($\sin(\omega t)$) gerado internamente pelo PLL.
- **Cálculo do Erro:** O resultado da multiplicação é o erro de fase. Teoricamente, se a fase da entrada (α) e a fase do oscilador (β) forem idênticas, o produto $\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta)$ resulta em uma componente de corrente contínua (CC) que é diretamente proporcional à diferença angular ($\alpha - \beta$). O PLL é sintonizado para o pico positivo da tensão de entrada, o que significa que o estado de equilíbrio ideal é alcançado quando o erro de fase é zero, ou seja, quando o oscilador interno está 90° defasado em relação à tensão de entrada.

O sinal de erro de fase é processado por um Controlador Proporcional-Integral (P-I) Discreto, cuja função é forçar o erro a zero.

- **Atuação do Controlador:** O controlador P-I, projetado para operar em tempo discreto, recebe o erro de fase (sinal In) e ajusta a frequência angular de saída (W). A ação integral é crucial para eliminar o erro em regime permanente, garantindo que a fase do oscilador se alinhe perfeitamente com a fase da rede.
- **Saída W:** A saída do P-I representa o ajuste necessário à frequência angular de forma a corrigir o desvio de frequência e fase detectado.

Esta seção converte a variável de ajuste W em um sinal de fase estável, fechando o laço de controle:

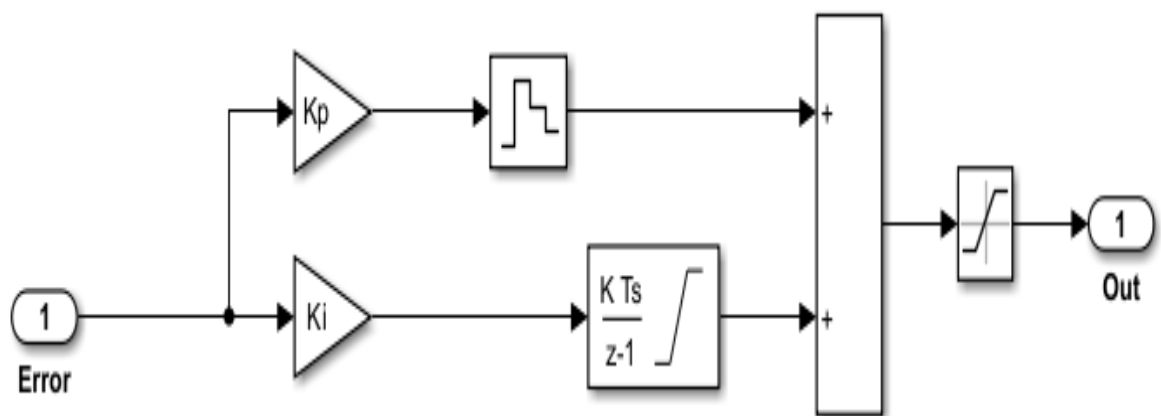
- **Integração Discreta:** A frequência angular (W) é integrada ao longo do tempo através do bloco discreto. A integração da frequência angular é o método matemático para obter a fase (ωt).
- **Normalização e Operador Módulo:** A saída do integrador é normalizada (dividida por 2π) para mapear o ciclo em uma faixa de 0 a 1. O Operador Módulo (Mod) garante que a fase seja reiniciada para zero sempre que um ciclo completo (1 ou 360°) for atingido, mantendo o valor de ωt dentro do intervalo de 0 a 1.
- **Geração Senoidal:** A fase normalizada é então convertida em um sinal senoidal para realimentar o Detector de Fase, completando o laço de *feedback* e permitindo que o PLL mantenha a sincronia. A saída principal deste estágio é o sinal de fase sincronizada (ωt).

Paralelamente à geração da fase, o sistema extrai a medição da frequência do sistema:

- Conversão para Hertz: A frequência angular W é convertida para Hertz (Hz) através da divisão por 2π .
- Filtragem e Limitação: O sinal passa por um Limitador para evitar valores irrealistas e, crucialmente, por um Filtro Passa-Baixa (*Low-Pass Filter*). Este filtro remove ruídos e oscilações do sinal de W , fornecendo uma leitura de frequência estável e confiável (Freq), essencial para outros cálculos no sistema de controle.

Em resumo, o PLL é uma ferramenta de extração e rastreamento de fase, garantindo que o sistema de controle do SVC opere com a precisão temporal necessária para o chaveamento sincronizado de seus dispositivos de potência.

Figura 28 - Controlador P-I



Fonte: Adaptado de Giroux, P.; Sybille, G.

O diagrama ilustra o Controlador Proporcional-Integral (P-I) implementado em um domínio discreto, um componente central em sistemas de controle digital como o *Phase-Locked Loop* (PLL) e o regulador de tensão do SVC. Embora a nomenclatura possa ocasionalmente incluir a sigla PID, o modelo apresentado prioriza as ações P e I, essenciais para garantir precisão e estabilidade em estado estacionário.

O controlador atua sobre o sinal de erro (Erro), que representa a discrepância entre o valor desejado (*setpoint*) e o valor real medido, ajustando o sinal de saída para que essa diferença seja minimizada e, idealmente, zerada.

A componente Proporcional confere a velocidade e a reação imediata ao controle:

- Ganho Proporcional ($K_p = 120$): O sinal de erro é multiplicado por K_p . Essa ação de controle é diretamente proporcional à magnitude do erro, o que

significa que um erro súbito e significativo desencadeia uma correção imediata e robusta, melhorando a resposta transitória do sistema.

- Amostragem (*Sample&Hold*): Em sistemas discretos, a componente P passa por um bloco de amostragem. Isso é fundamental para manter o valor de controle constante durante cada ciclo de amostragem (T_s), garantindo a integridade do processamento digital.

A componente Integral é responsável pela precisão e pela eliminação do erro de estado estacionário:

- Ganho Integral ($K_i = 2800$): O erro é multiplicado pelo ganho K_i .
- Integração Discreta ($z^{-1}K \cdot T_s$): O termo $z^{-1}K \cdot T_s$ representa a integração em ambiente digital. Essa operação acumula o erro ao longo do tempo. Se um erro residual persistir (mesmo que pequeno), a saída integral continuará a crescer até que o erro seja completamente corrigido. Esta é a característica chave que diferencia o controlador P-I do P puro, garantindo precisão absoluta no longo prazo.

As ações P e I são combinadas sinergicamente e preparadas para atuar no sistema:

- Somatório: As saídas P e I são somadas para gerar o sinal de controle total.
- Saturador (*Limitter*): A saída final é submetida a um limitador (saturador). Este bloco é uma salvaguarda operacional essencial, pois impede que a saída do controlador exceda os limites físicos e de *rating* do componente que está sendo controlado (e.g., a máxima taxa de variação de frequência de um oscilador ou a máxima susceptância de um compensador). O limitador garante a operação segura do sistema.

Em resumo, o Controlador P-I Discreto oferece uma solução de controle poderosa: a ação Proporcional assegura uma resposta rápida e ágil, enquanto a ação Integral garante a eliminação completa de desvios em estado estacionário. Essa combinação otimiza o desempenho dinâmico e a precisão em regime permanente, características indispensáveis para a estabilidade e sincronismo de sistemas FACTS.

4. RESULTADOS

A partir da modelagem do SVC, cuja potência é de -125/+250 MVar, tem-se as simulações para os seguintes casos.

4.1 CASO 1

No primeiro cenário, tem-se a resposta a queda de tensão (transiente principal), cuja velocidade e precisão do SVC é testada para recuperar a tensão após uma falta no sistema. Deste modo, configura-se a fonte de tensão com sequência positiva, cuja tensão é 440 kV, frequência de 60 Hz, com variação da amplitude pelo tempo, sendo 5 pontos no tempo (0, 0,3, 0,4, 0,6 e 0,7). Para tal queda, a amplitude da tensão é configurada para 0.95 p.u., a partir do instante $t=0,3s$, conforme a Figura 29.

Figura 29 - Dados para o caso 1

Block Parameters: Programmable Voltage Source

Three-Phase Programmable Voltage Source (mask) (link)

This block implements a three-phase zero-impedance voltage source. The common node (neutral) of the three sources is accessible via input 1 (N) of the block. Time variation for the amplitude, phase and frequency of the fundamental can be pre-programmed. In addition, two harmonics can be superimposed on the fundamental.

Note: For "Phasor simulation", frequency variation and harmonic injection are not allowed. Specify Order =1 and Seq=1,2 or 0 to inject additional fundamental components A and B in any sequence.

Parameters Load Flow

Positive-sequence: [Amplitude(Vrms Ph-Ph) Phase(deg.) Freq. (Hz)] [1.004*440e3 0 60]

Time variation of: Amplitude

Type of variation: Table of time-amplitude pairs

☐ Variation on phase A only

Amplitude values (pu): [1.0 0.95 0.95 1.0 1.0]

Time values: [0 0.3 0.4 0.6 0.7]

☐ Fundamental and/or Harmonic generation:

OK Cancel Help Apply

Fonte: Produção do próprio autor.

Neste primeiro gráfico, ilustrado pela Figura 30, observa-se que até o instante $t=0,3s$, o Compensador não está trabalhando, após este instante, tem-se uma queda

de tensão, vista pelo V_{meas} , aumentando a susceptância do SVC, com o disparo dos tiristores dos TSC's, mantendo-se até o instante $t=0,7s$, cuja tensão do sistema tem um pico por um instante, devido a introdução de potência reativa capacitiva, e retornando ao normal, com o disparo do TSC.

Figura 30 - Simulação da tensão medida, susceptância, ângulo de disparo e número de TSCs



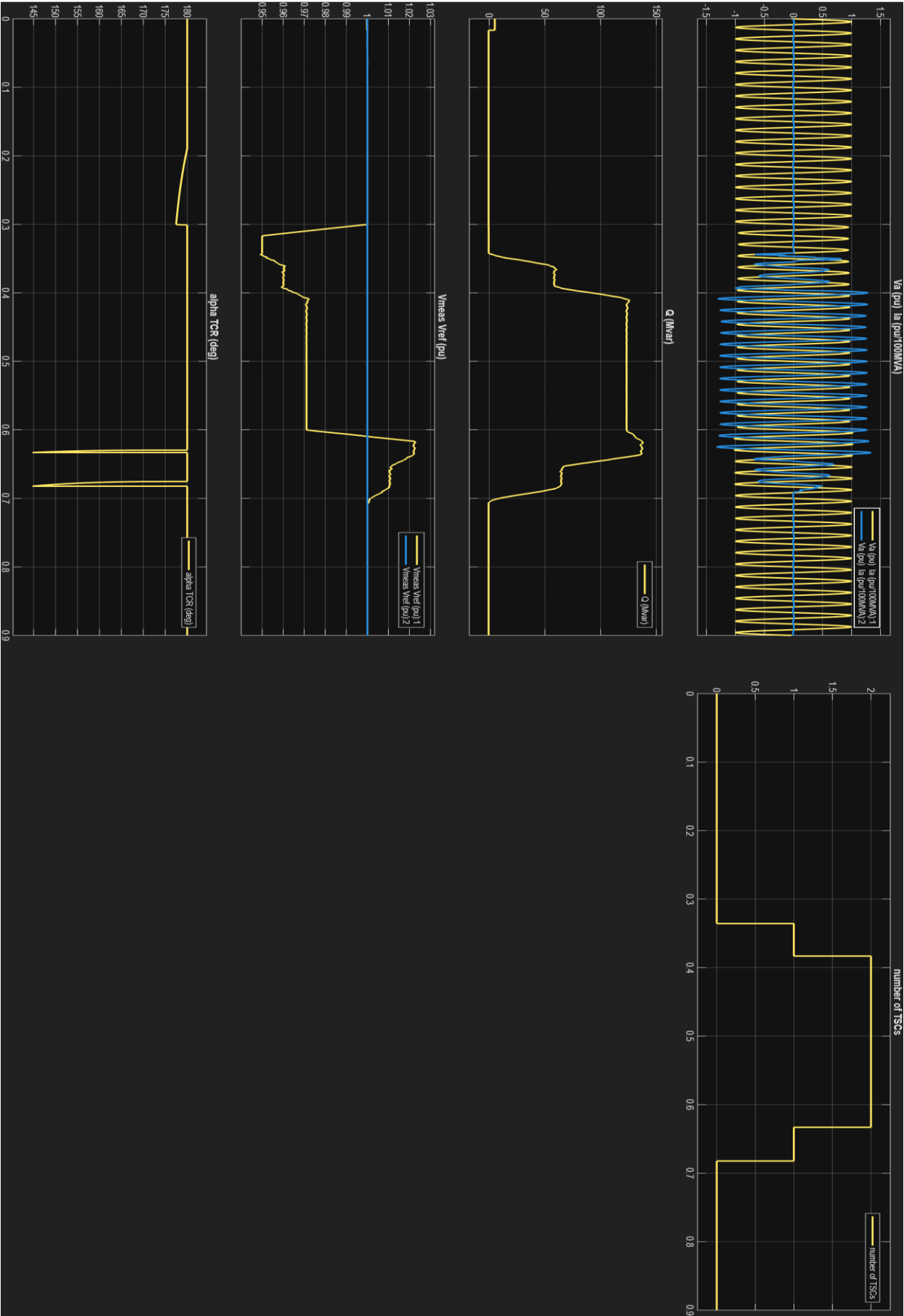
Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 31, tem-se a simulação do sistema como um todo, assim como na simulação acima, é gerado gráficos para o V_{meas} , α e o número de TSCs acionados. Observa-se que no instante $t=0,3s$, quando os TSCs são disparados, há o aumento da potência reativa capacitiva, chegando ao valor de +125 Mvar, devido à queda de tensão para 0.95 pu, logo, para equilibrar o sistema, a corrente é adiantada em relação à tensão, uma característica do TSC, visto no gráfico V_a (pu) x I_a (pu), representado pela onda na coloração azulada. Quando o sistema atinge uma tensão de 1.02 pu, entre os instantes 0,6s e 0,7s, os TSCs são desligados, dessa forma, volta-se ao equilíbrio.

Na simulação no TCR, apresentada pela Figura 32 como o caso é sobre uma subtensão no sistema, em nenhum momento ele é acionado efetivamente, pois não é necessário a introdução de potência reativa indutiva no sistema.

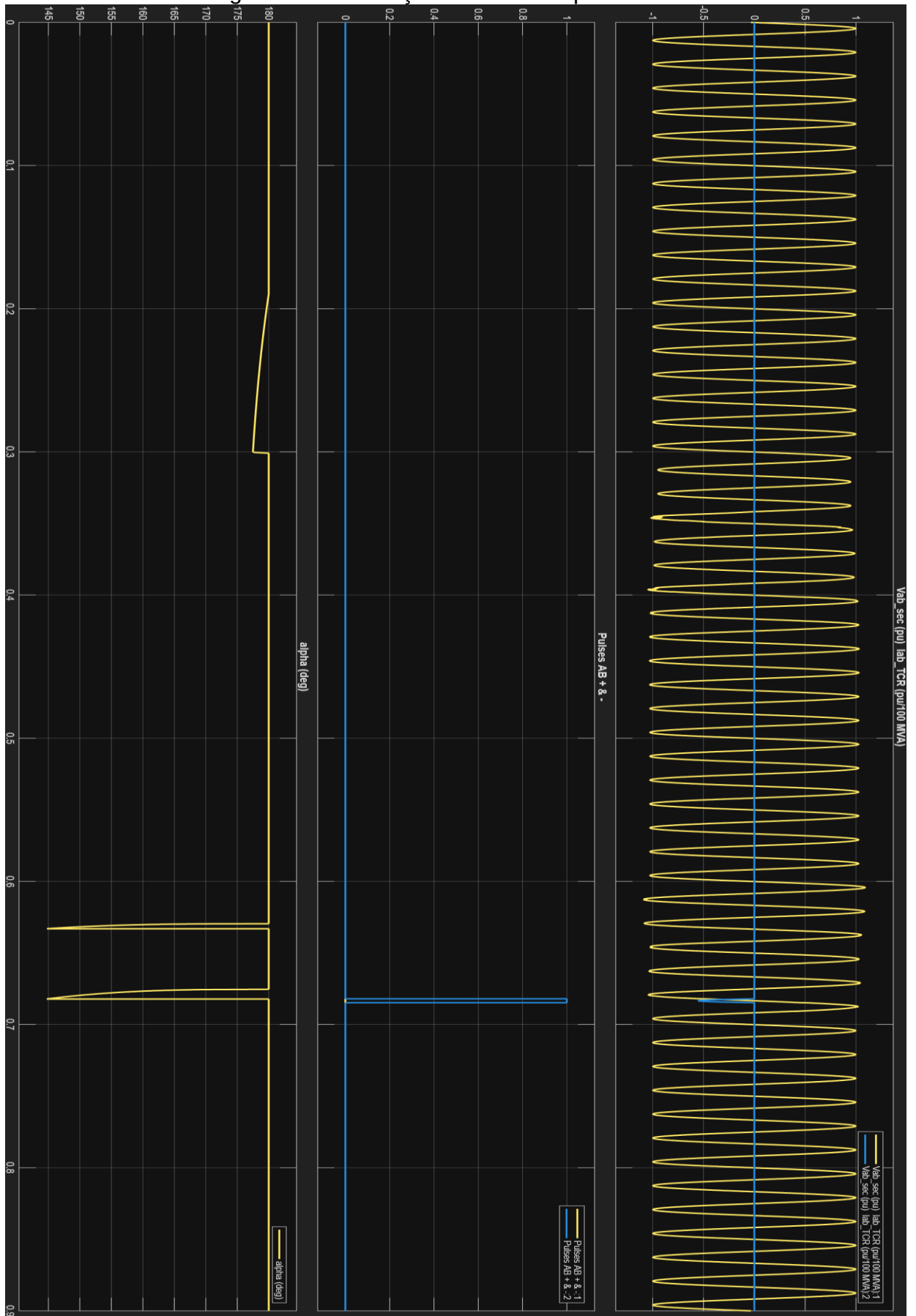
No gráfico representado pela Figura 33, tem-se os sinais do TSC, cujo funcionamento ocorre no instante $t=0,3s$, injetando potência reativa capacitiva no sistema, para que continue estável.

Figura 31 - Simulação da tensão e corrente na entrada, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo e número de TSCs



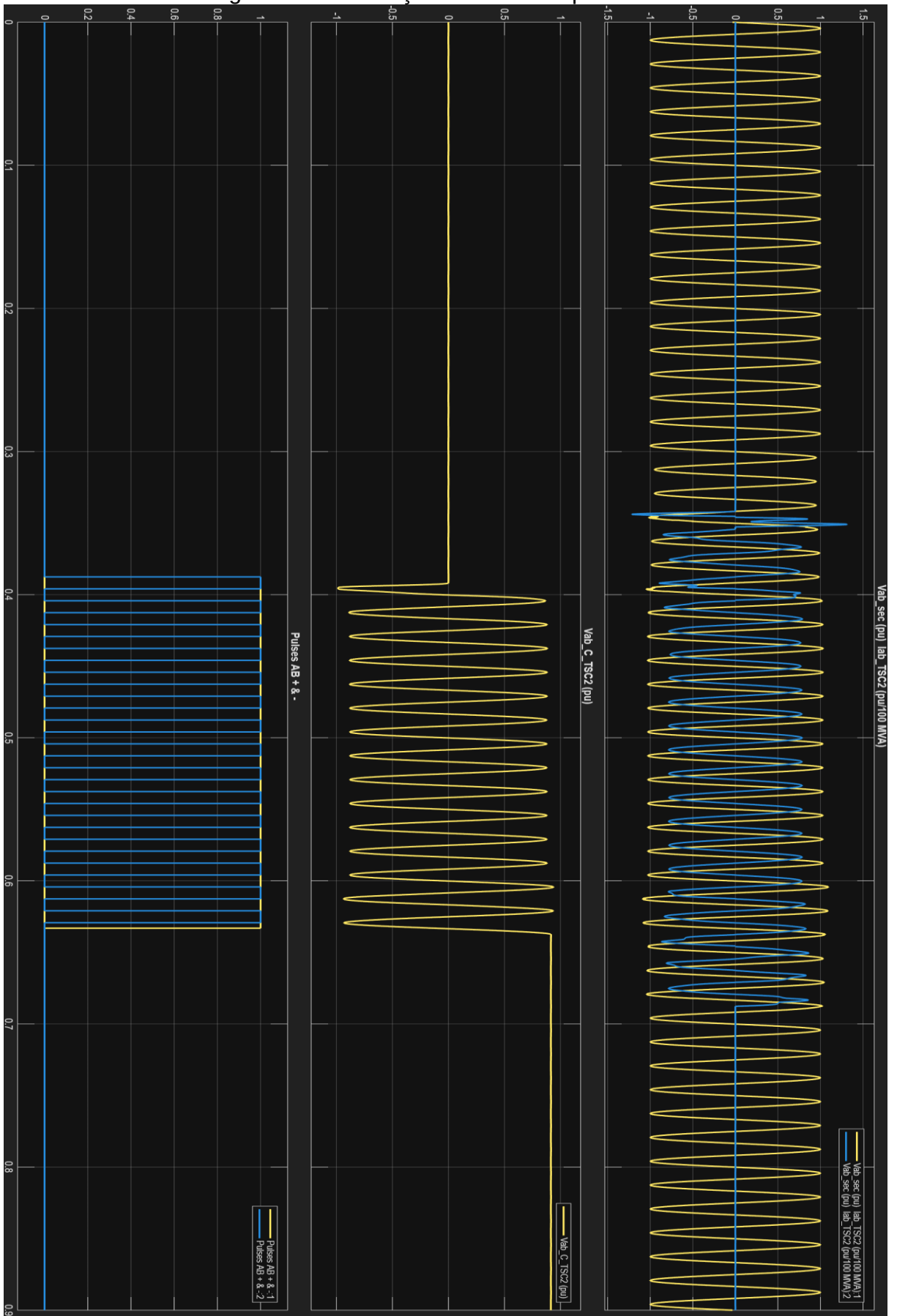
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 32 - Simulação no TCR na queda de tensão



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 33 - Simulação no TSC na queda de tensão



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 CASO 2

Para este caso, a queda de tensão é maior, a fim de verificar a rapidez de acionamento do TSC, e se o TSC conseguirá manter o controle fino ou saturará.

Figura 34 - Dados para o caso 2

Block Parameters: Programmable Voltage Source

Three-Phase Programmable Voltage Source (mask) (link)

This block implements a three-phase zero-impedance voltage source. The common node (neutral) of the three sources is accessible via input 1 (N) of the block. Time variation for the amplitude, phase and frequency of the fundamental can be pre-programmed. In addition, two harmonics can be superimposed on the fundamental.

Note: For "Phasor simulation", frequency variation and harmonic injection are not allowed. Specify Order =1 and Seq=1,2 or 0 to inject additional fundamental components A and B in any sequence.

Parameters Load Flow

Positive-sequence: [Amplitude(Vrms Ph-Ph) Phase(deg.) Freq. (Hz)] [1.004*440e3 0 60]

Time variation of: Amplitude

Type of variation: Table of time-amplitude pairs

☐ Variation on phase A only

Amplitude values (pu): [1.0 0.85 0.85 1.0 1.0]

Time values: [0 0.3 0.4 0.6 0.7]

☐ Fundamental and/or Harmonic generation:

OK Cancel Help Apply

Fonte: Produção do próprio autor.

No gráfico de controle geral do SVC, apresentada pela Figura 35 observa-se que é análogo ao primeiro caso, com a susceptância sendo maior, passando dos 3 pu, e se mantendo constante, visto que espera-se que o SVC necessite de mais potência para tentar corrigir a queda de tensão

Verifica-se na Figura 36, que para acontecer o disparo de ambos TSCs é mais rápido, pela queda de tensão ser maior que no primeiro caso, porém injetou menos potência reativa, sendo possível que o SVC atingiu o limite de potência reativa em um nível mais baixo, ou até a demanda reativa do sistema é maior, mas o SVC não pode suprir mais.

Conforme é esperado, o TCR não é disparado efetivamente, conforme Figura 37, sendo acionado em pontos que a tensão medida é maior que a tensão de referência, para o sistema voltar a tensão de 1 pu.

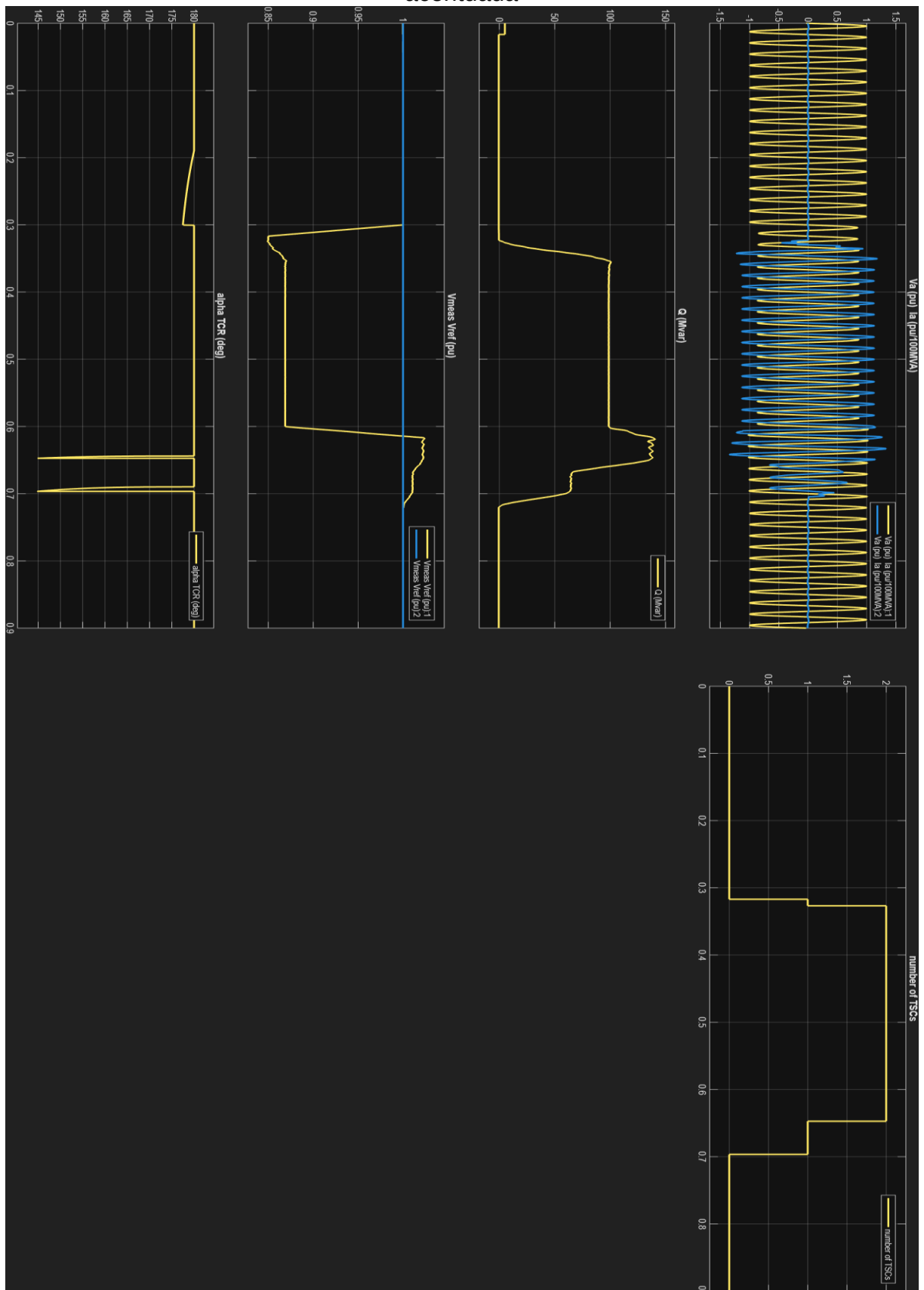
Na Figura 38, observa-se que o disparo dos TSCs é mais rápido em uma queda maior, em comparação com o primeiro caso, cujo disparo é mais lento.

Figura 35 - Simulação da tensão medida, susceptância, ângulo de disparo e número de TSCs para queda de tensão acentuada



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 36 - Simulação da tensão e corrente na entrada, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo e número de TSCs para queda de tensão acentuada



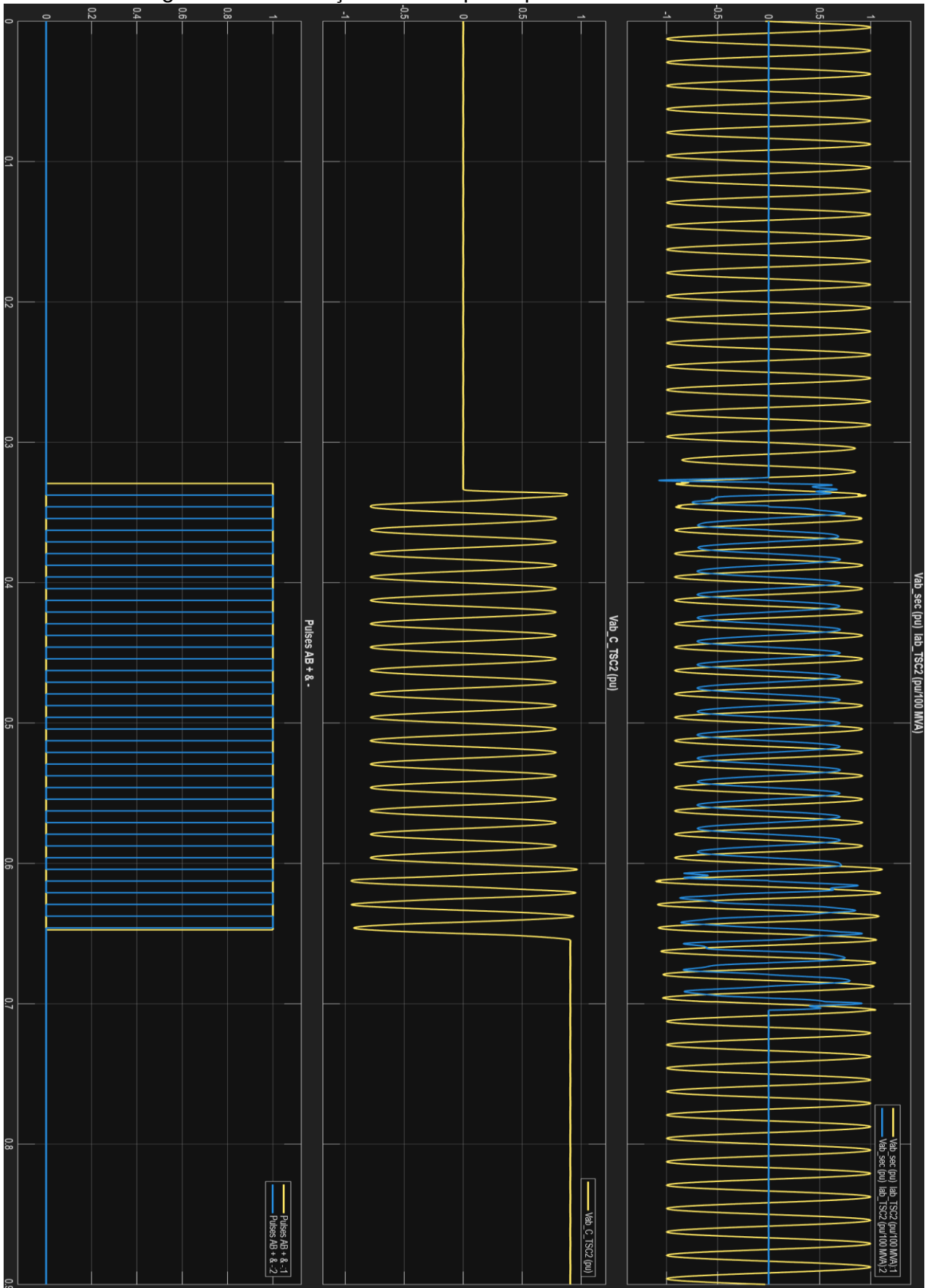
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 37 - Simulação no TCR para queda de tensão acentuada



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 38 - Simulação no TSC para queda de tensão acentuada



Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 CASO 3

Para o caso 3, foi configurado na fonte, uma leve sobretensão no sistema, na tensão de 1,05 pu, neste cenário, o TCR é testado para absorver potência reativa para reduzir a tensão.

Figura 39 - Dados para o Caso 3

Block Parameters: Programmable Voltage Source

Three-Phase Programmable Voltage Source (mask) (link)

This block implements a three-phase zero-impedance voltage source. The common node (neutral) of the three sources is accessible via input 1 (N) of the block. Time variation for the amplitude, phase and frequency of the fundamental can be pre-programmed. In addition, two harmonics can be superimposed on the fundamental.

Note: For "Phasor simulation", frequency variation and harmonic injection are not allowed. Specify Order =1 and Seq=1,2 or 0 to inject additional fundamental components A and B in any sequence.

Parameters Load Flow

Positive-sequence: [Amplitude(Vrms Ph-Ph) Phase(deg.) Freq. (Hz)] [1.004*440e3 0 60]

Time variation of: Amplitude

Type of variation: Table of time-amplitude pairs

☐ Variation on phase A only

Amplitude values (pu): [1.0 1.05 1.05 1.0 1.0]

Time values: [0 0.3 0.4 0.6 0.7]

☐ Fundamental and/or Harmonic generation:

OK Cancel Help Apply

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 40, observa-se que a sobretensão ocorre no instante $t=0,3s$, com a ação do SVC, absorvendo reativo, a tensão é reduzida mantendo-se próxima ao valor de referência até o fim da perturbação. Para que o SVC absorva reativos, o sistema deve introduzir potência reativa indutiva, visto pela susceptância ser negativa, bem como o disparo do TCR no sistema, visto pela variação do ângulo α , sendo totalmente conduzido e a ação dos TSCs, indicando que nenhum foi acionado.

Na Figura 41, a relação entre V_a e I_a é observada pelo atraso da corrente em relação a tensão, este atraso é a assinatura da absorção de potência reativa, confirmando que o TCR está funcionando adequadamente, abaixando a tensão do barramento. A curva da potência é negativa em $t=0,4s$, ou seja, absorvendo potência

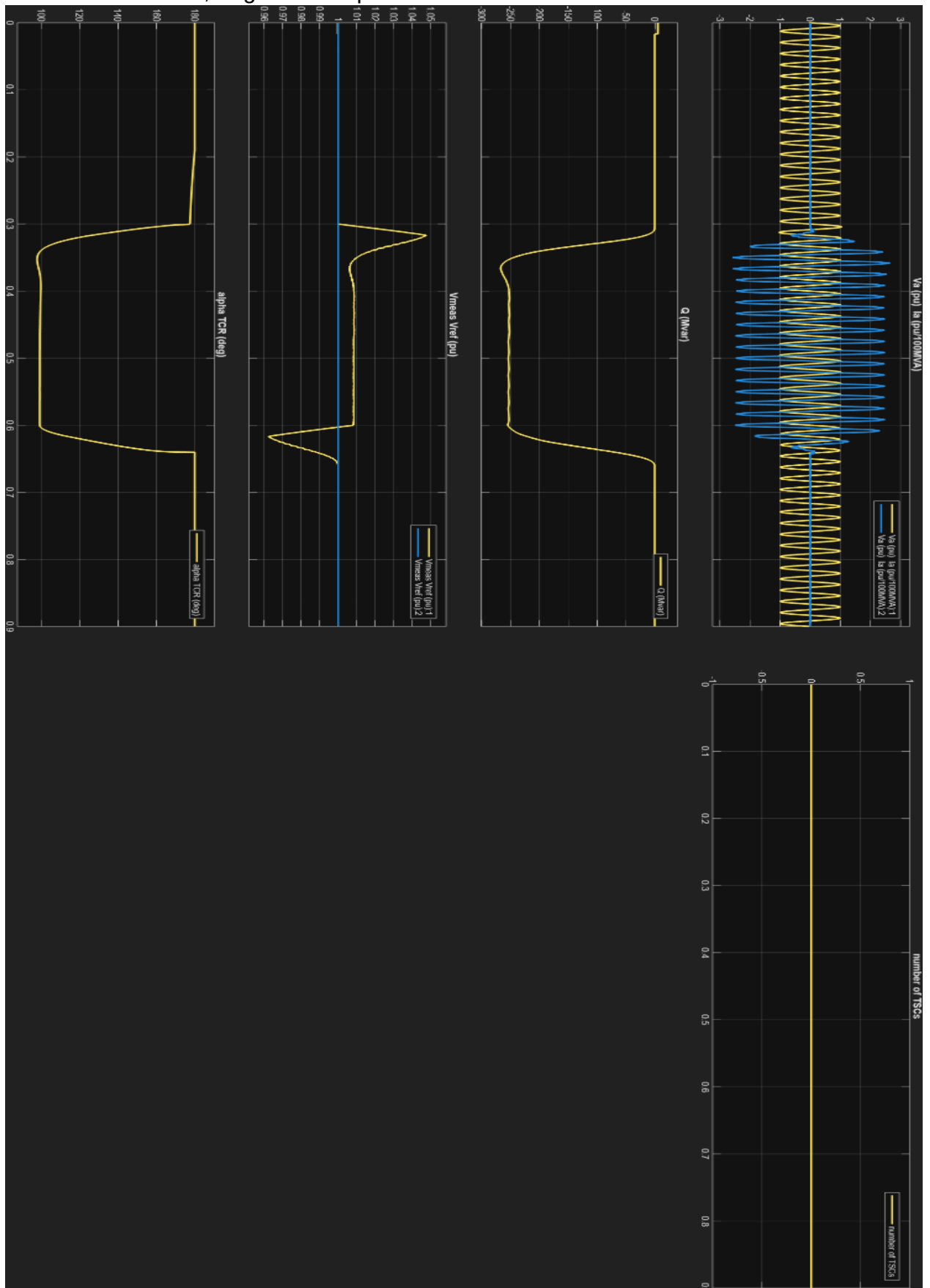
até 0,6s, em que o sistema volta ao normal. E a tensão medida após $t=0,6s$, é menor devido ao residual de potência reativa indutiva no sistema, com uma pequena duração.

Figura 40 - Simulação da tensão medida, susceptância, ângulo de disparo e TSCs acionados para sobretensão



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 41- Simulação da tensão e corrente na fase A, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo e TCRs acionados na sobretensão

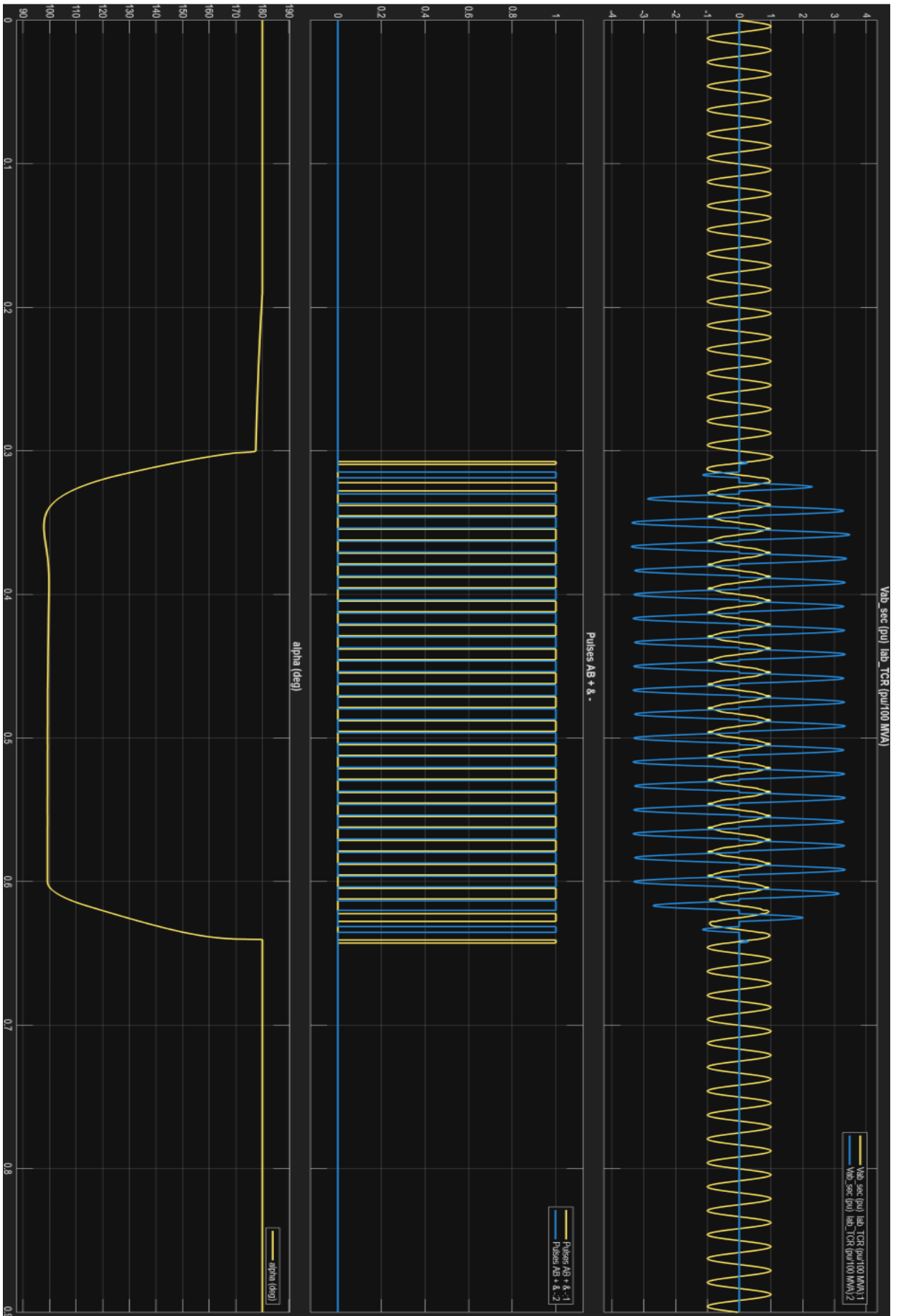


Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 42, confirma-se as afirmações anteriores, em que a tensão e a corrente são defasadas, cuja corrente é atrasada em relação à tensão.

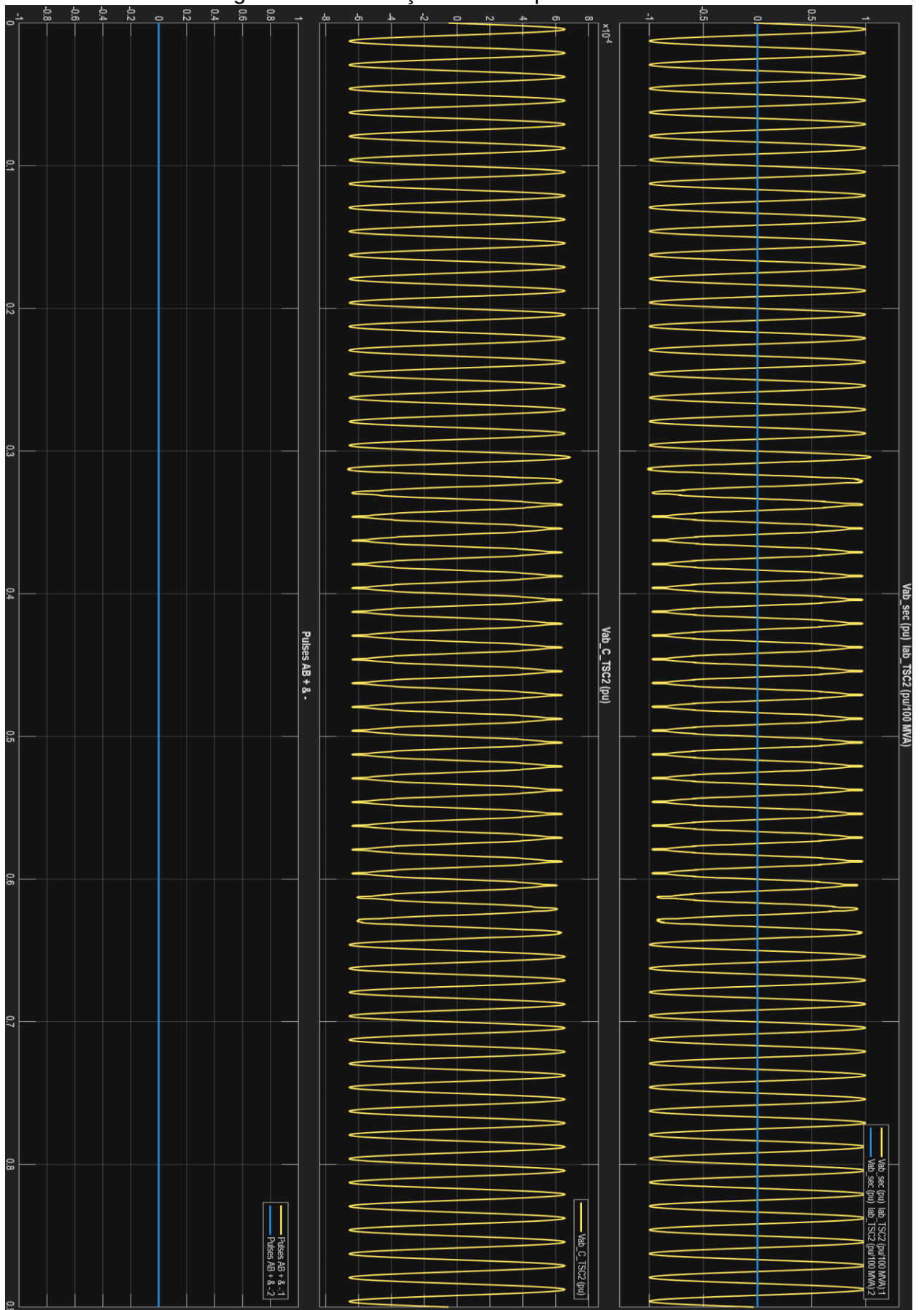
Na Figura 43, os TSCs não são ligados, uma vez que não é necessário que a potência reativa seja introduzida no sistema.

Figura 42 - Simulação do TCR na sobretensão



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 43 - Simulação do TSC para a sobretensão



Fonte: Produção do próprio autor.

4.4 CASO 4

Para o quarto caso, tem-se uma sobretensão maior comparado ao terceiro caso, cujo valor da tensão aumenta para 1,1 pu, demonstrado na Figura 44.

Figura 44 - Dados para o caso 4

Block Parameters: Programmable Voltage Source

Three-Phase Programmable Voltage Source (mask) (link)

This block implements a three-phase zero-impedance voltage source. The common node (neutral) of the three sources is accessible via input 1 (N) of the block. Time variation for the amplitude, phase and frequency of the fundamental can be pre-programmed. In addition, two harmonics can be superimposed on the fundamental.

Note: For "Phasor simulation", frequency variation and harmonic injection are not allowed. Specify Order =1 and Seq=1,2 or 0 to inject additional fundamental components A and B in any sequence.

Parameters Load Flow

Positive-sequence: [Amplitude(Vrms Ph-Ph) Phase(deg.) Freq. (Hz)] [1.004*440e3 0 60]

Time variation of: Amplitude

Type of variation: Table of time-amplitude pairs

☐ Variation on phase A only

Amplitude values (pu): [1.0 1.1 1.1 1.0 1.0]

Time values: [0 0.3 0.4 0.6 0.7]

☐ Fundamental and/or Harmonic generation:

OK Cancel Help Apply

Fonte: Produção do próprio autor.

No gráfico apresentado pela Figura 45, o funcionamento do SVC para este caso é absorver a potência reativa do sistema, verificado pelas curvas Vmeas, BSVC, alpha e os TSCs. Na curva da Vmeas, a tensão atinge 1,1 pu, logo, o TCR é acionado, visto pelas curvas do BSVC e alpha, cujo valor de BSVC é negativo, ou seja, a potência reativa indutiva é maior que a capacitiva, e o ângulo alpha é deslocado para 90°. Tal tensão se mantém até 0,6s, e abaixa para 0,95 pu, devido ao desligamento do TCR, voltando ao equilíbrio.

Figura 45 - Simulação da tensão medida, susceptância, ângulo de disparo e TSCs acionados para uma sobretensão mais acentuada



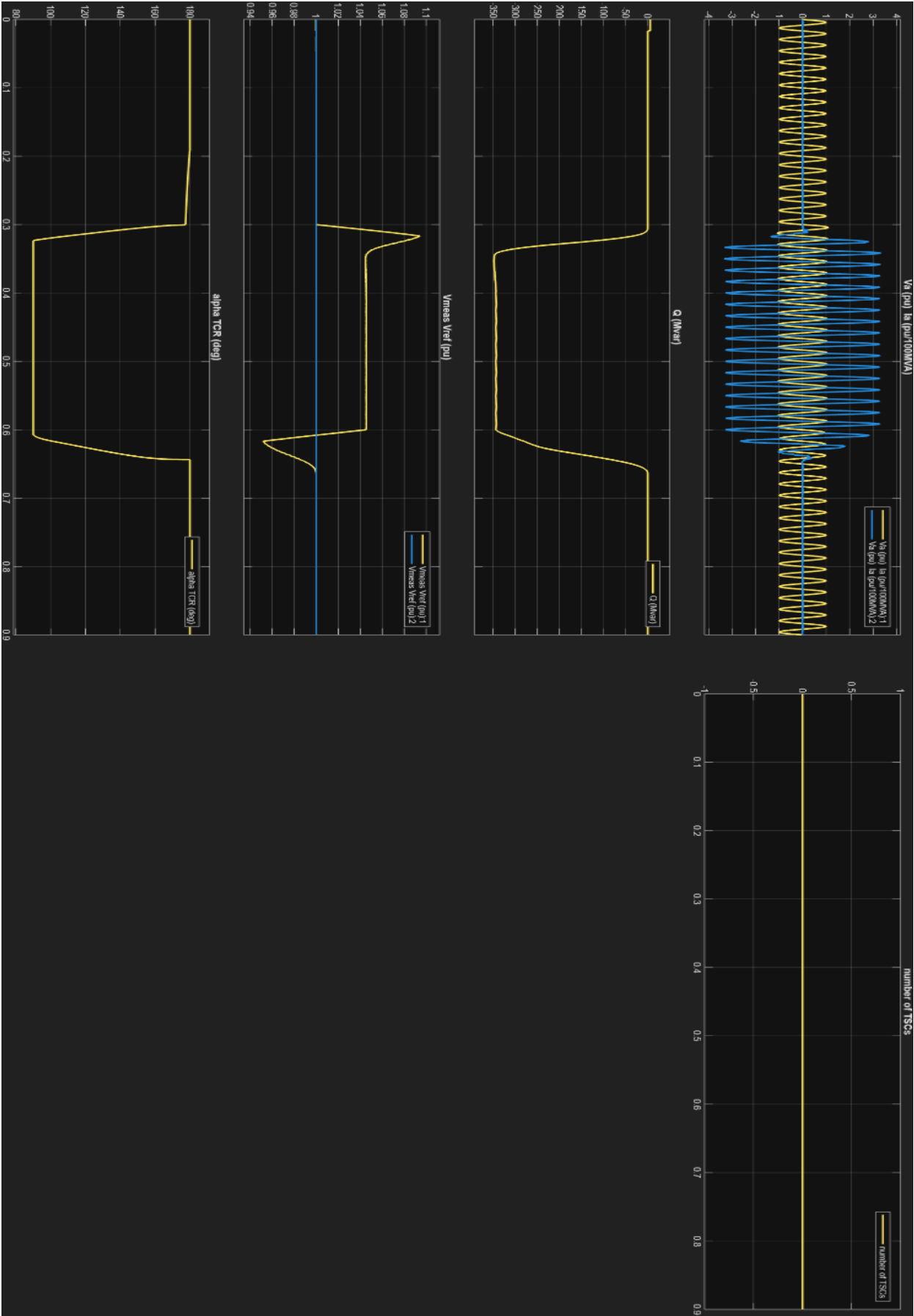
Fonte: Produção do próprio autor.

No gráfico ilustrado pela Figura 46, é apresentada a relação entre a tensão e a corrente, em que se verifica o atraso da corrente em relação a tensão, característica do SVC quando está absorvendo potência reativa e o TCR encontra-se ligado, consequentemente, observa-se que a potência reativa no instante $t=0,3s$, é negativa, de modo a regular a tensão V_{meas} , no qual manteve-se constante após o TCR ligar. Além disso, para confirmar o funcionamento do SVC para este caso, o ângulo α cai para próximo de 90° , indicando que houve o disparo do TCR, e o número de TSCs manteve-se em zero, não sendo necessário a injeção de potência reativa no sistema.

Na Figura 47, observa-se o comportamento do TCR, no instante $t=0,3s$, o indutor defasa a corrente em relação à tensão, com os pulsos do TCR e o ângulo α decaindo para 90° , reafirmando o funcionamento do SVC.

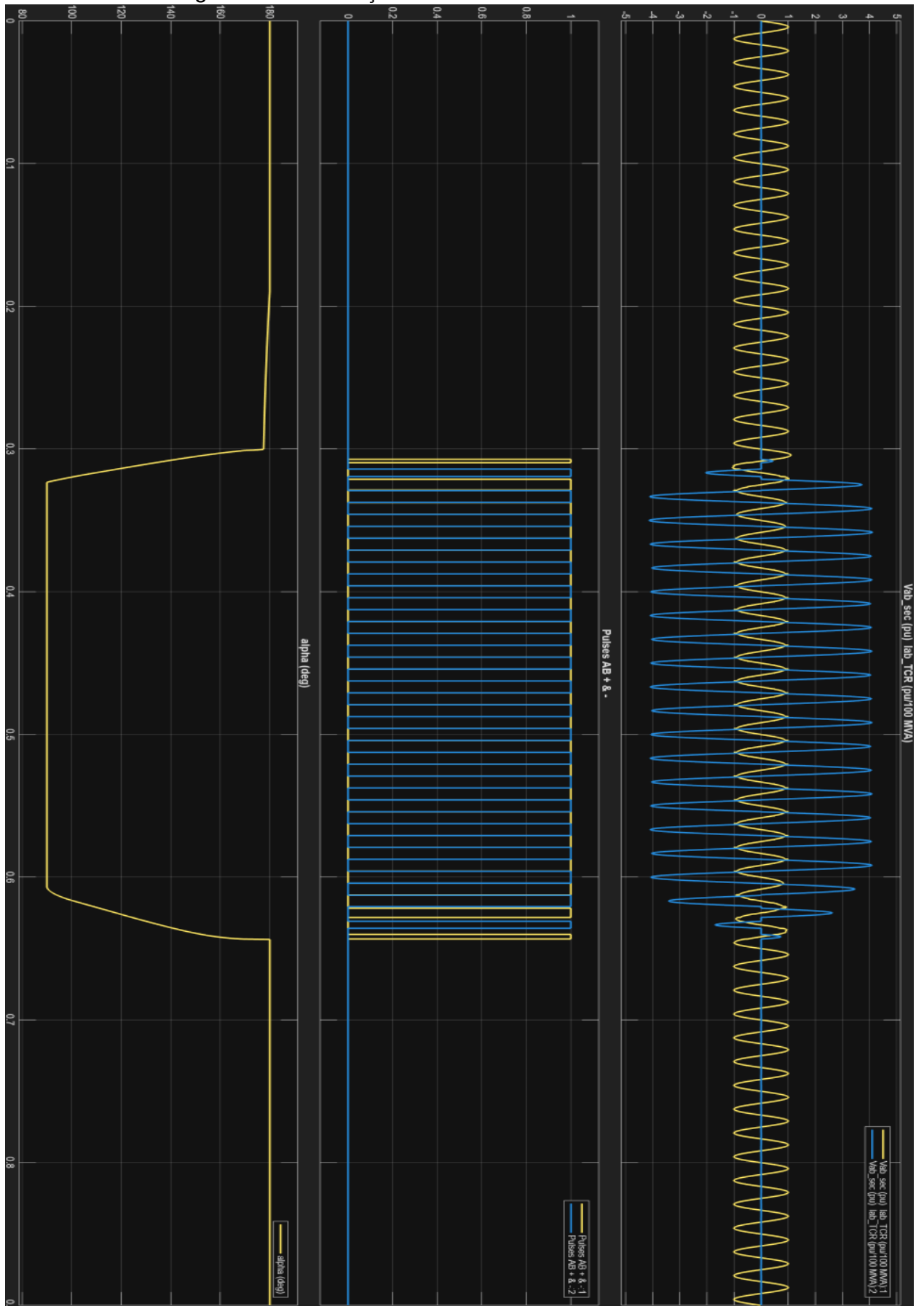
Na Figura 48, devido ao TSC em nenhum momento ser ligado, não há variação nas curvas da tensão e corrente no TSC, e no número de TSCs.

Figura 46 - Simulação da tensão e corrente na fase A, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo e TSCs acionados na sobretensão acentuada



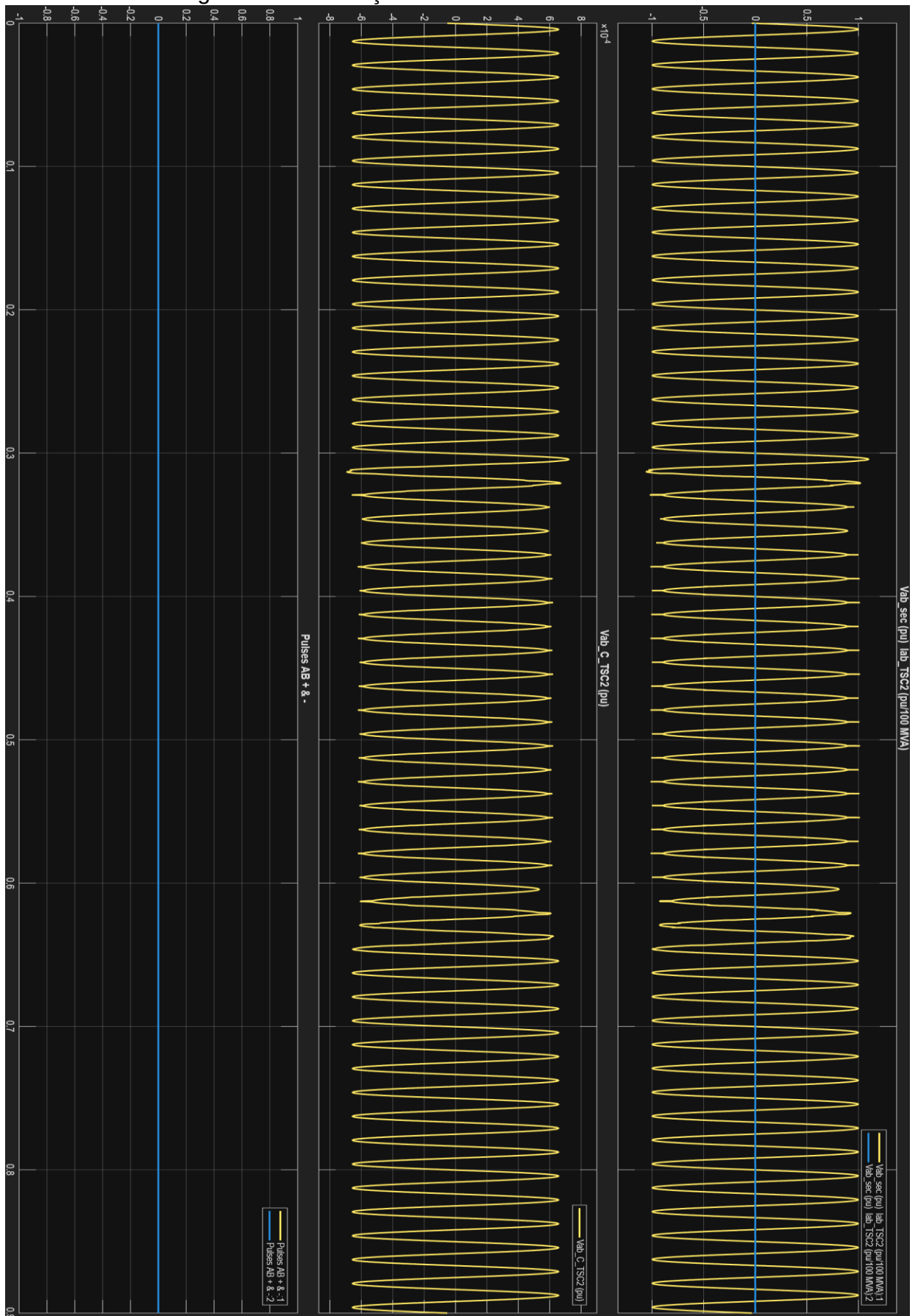
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 47 - Simulação no TCR na sobretensão acentuada



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 48 - Simulação no TSC na sobretensão acentuada



Fonte: Produção do próprio autor.

4.5 CASO 5

Para o quinto caso, simulou-se o sistema para transição de uma subtensão e logo em seguida uma sobretensão, apresentado pela Figura 49, a fim de verificar se o SVC muda rapidamente de um regime de injeção máxima para um regime de absorção máxima.

Figura 49 - Dados para o caso 5

Block Parameters: Programmable Voltage Source

Three-Phase Programmable Voltage Source (mask) (link)

This block implements a three-phase zero-impedance voltage source. The common node (neutral) of the three sources is accessible via input 1 (N) of the block. Time variation for the amplitude, phase and frequency of the fundamental can be pre-programmed. In addition, two harmonics can be superimposed on the fundamental.

Note: For "Phasor simulation", frequency variation and harmonic injection are not allowed. Specify Order =1 and Seq=1,2 or 0 to inject additional fundamental components A and B in any sequence.

Parameters Load Flow

Positive-sequence: [Amplitude(Vrms Ph-Ph) Phase(deg.) Freq. (Hz)] [1.004*440e3 0 60]

Time variation of: Amplitude

Type of variation: Table of time-amplitude pairs

☐ Variation on phase A only

Amplitude values (pu): [1.0 0.9 0.9 1.1 1.1]

Time values: [0 0.3 0.4 0.6 0.7]

☐ Fundamental and/or Harmonic generation:

OK Cancel Help Apply

Fonte: Produção do próprio autor.

No gráfico apresentado pela Figura 50, verifica-se que o funcionamento do SVC para este caso ocorre de maneira adequada, uma vez que no instante $t=0,3s$, quando há uma subtensão, o valor da susceptância é positivo, logo a potência reativa está sendo injetada no sistema, verificada pelo número de TSCs acionados, e de maneira análoga, quando ocorre a sobretensão após $0,6s$, o valor da susceptância é negativo, acompanhado do disparo do ângulo α , decaindo para 90° , para controlar o aumento de tensão. As transições entre a subtensão e sobretensão são recuperadas

rapidamente, acompanhadas de poucas oscilações quando está absorvendo a potência, e da limitação do pico da sobretensão.

Figura 50 - Simulação da tensão medida, susceptância, ângulo de disparo e TSCs acionados na transição de subtenção para sobretensão



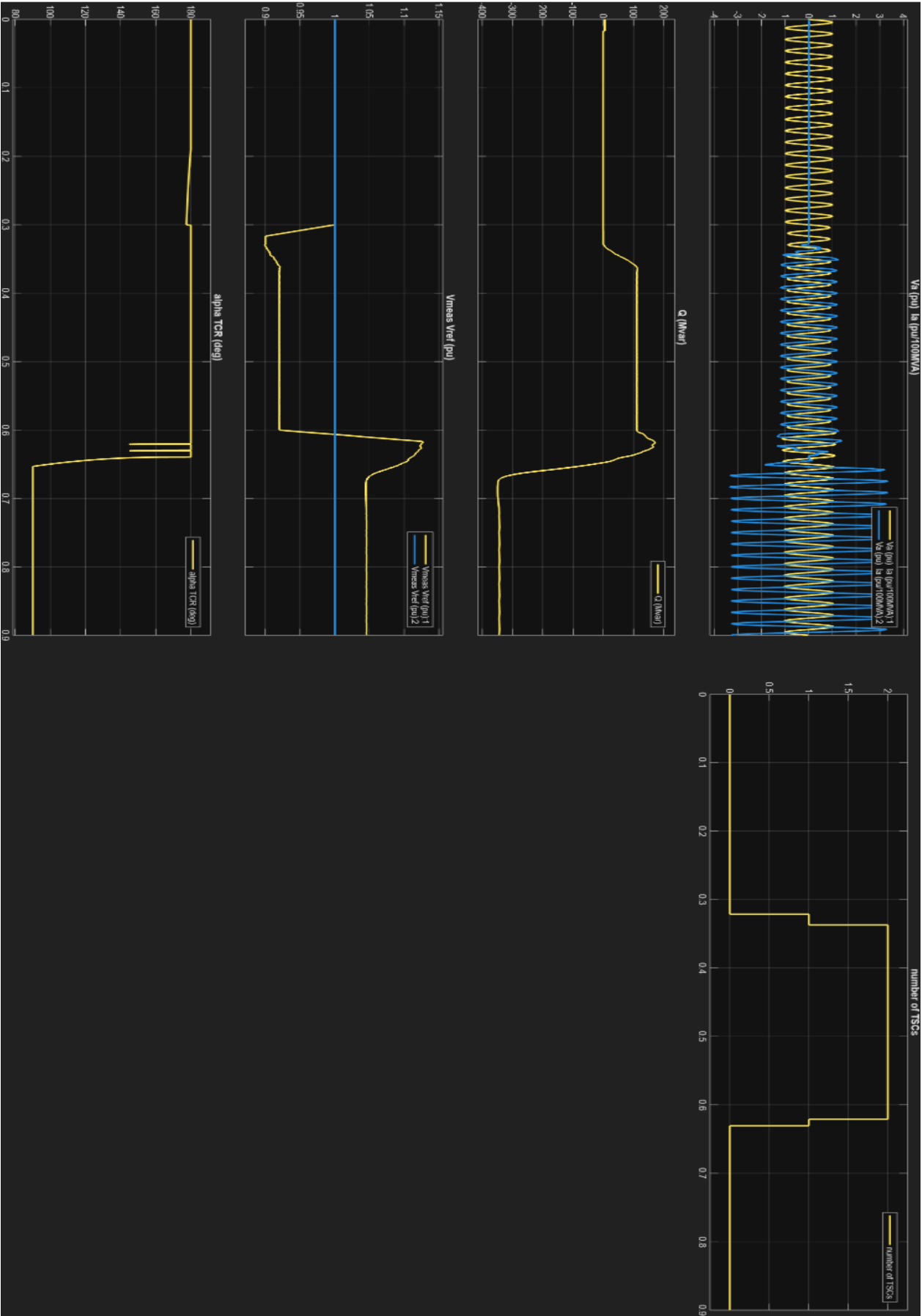
Fonte: Produção do próprio autor.

Da Figura 51, conclui-se que no instante $t=0,3s$, a corrente é adiantada em relação à tensão, evidenciando que os TSCs ligam, injetando potência reativa no sistema, para aumentar a tensão no sistema. Após $t=0,6s$, tem-se um aumento na tensão, com isso, é necessário que os TSCs sejam desligados, e que o TCR seja disparado, de modo que absorva potência reativa, diminuindo a tensão medida no sistema, sendo próxima a tensão de referência.

No instante da sobretensão, o controle comanda a absorção de reativos, que requer a saída do banco TSC. Para evitar o pico de tensão que ocorreria pela remoção abrupta da injeção capacitiva, a coordenação ocorre em duas etapas suaves. O TCR é rapidamente ligado (o ângulo α é reduzido) para absorver uma potência reativa indutiva que quase iguala a potência que o TSC estava injetando. O TSC é então desligado (no momento de zero tensão nos tiristores, como esperado).

O resultado é que a susceptância total do SVC não apresenta um "salto" de injeção máxima para zero, mas sim uma transição rápida e suave que se move imediatamente para a região de absorção (TCR ativo), permitindo que a tensão da barra comece a ser corrigida rapidamente sem a ocorrência de grandes oscilações transitórias. A curva de tensão da barra mostra um rápido movimento em direção ao seu valor de referência.

Figura 51 - Simulação da tensão e corrente da fase A, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo, TSCs acionados para a transição de subtensão para sobretensão

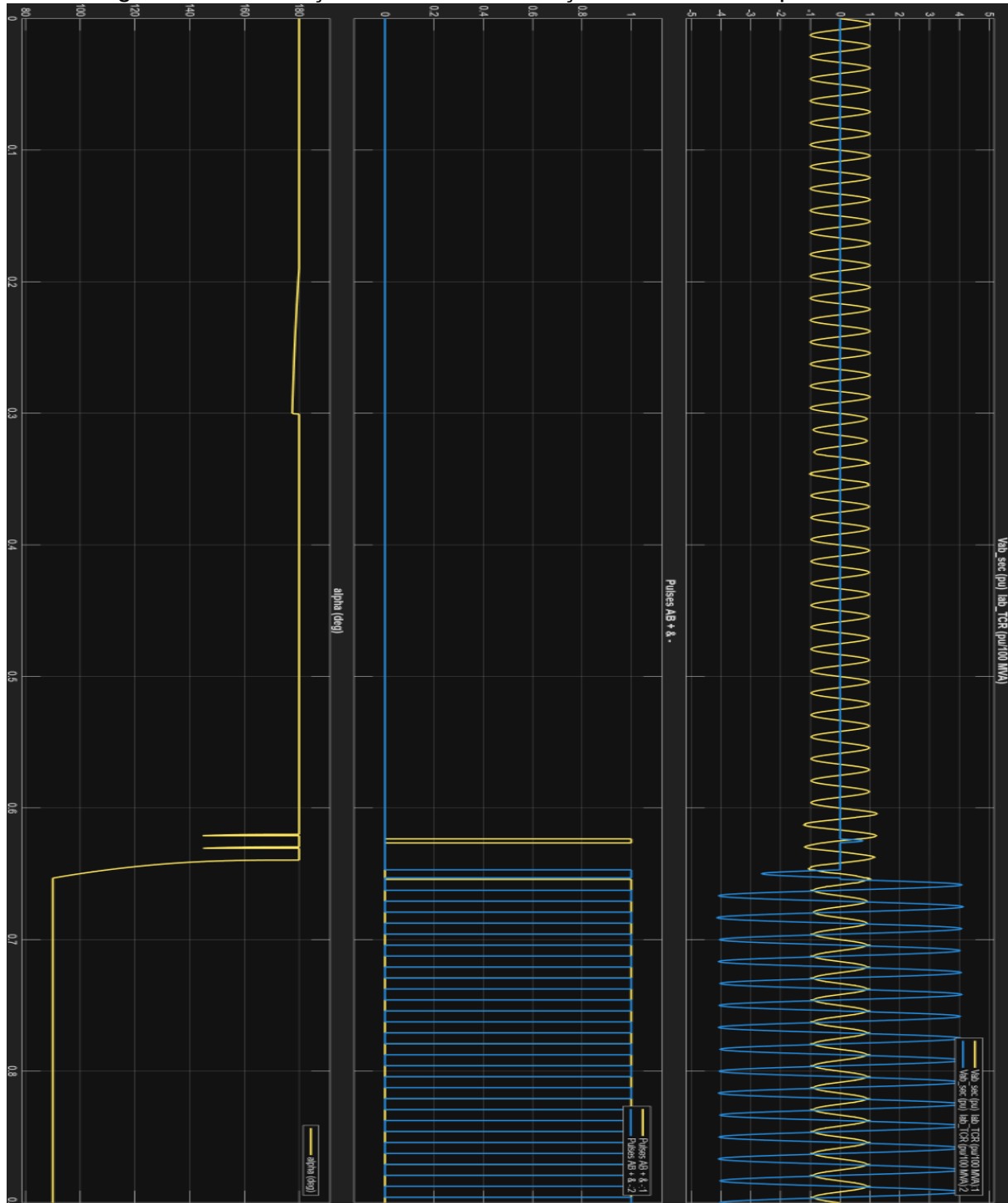


Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 52, para confirmar o funcionamento do SVC, no instante $t=0,6s$, verifica-se o atraso da corrente em relação à tensão, quando o TCR é disparado, com o ângulo α mudando sua angulação.

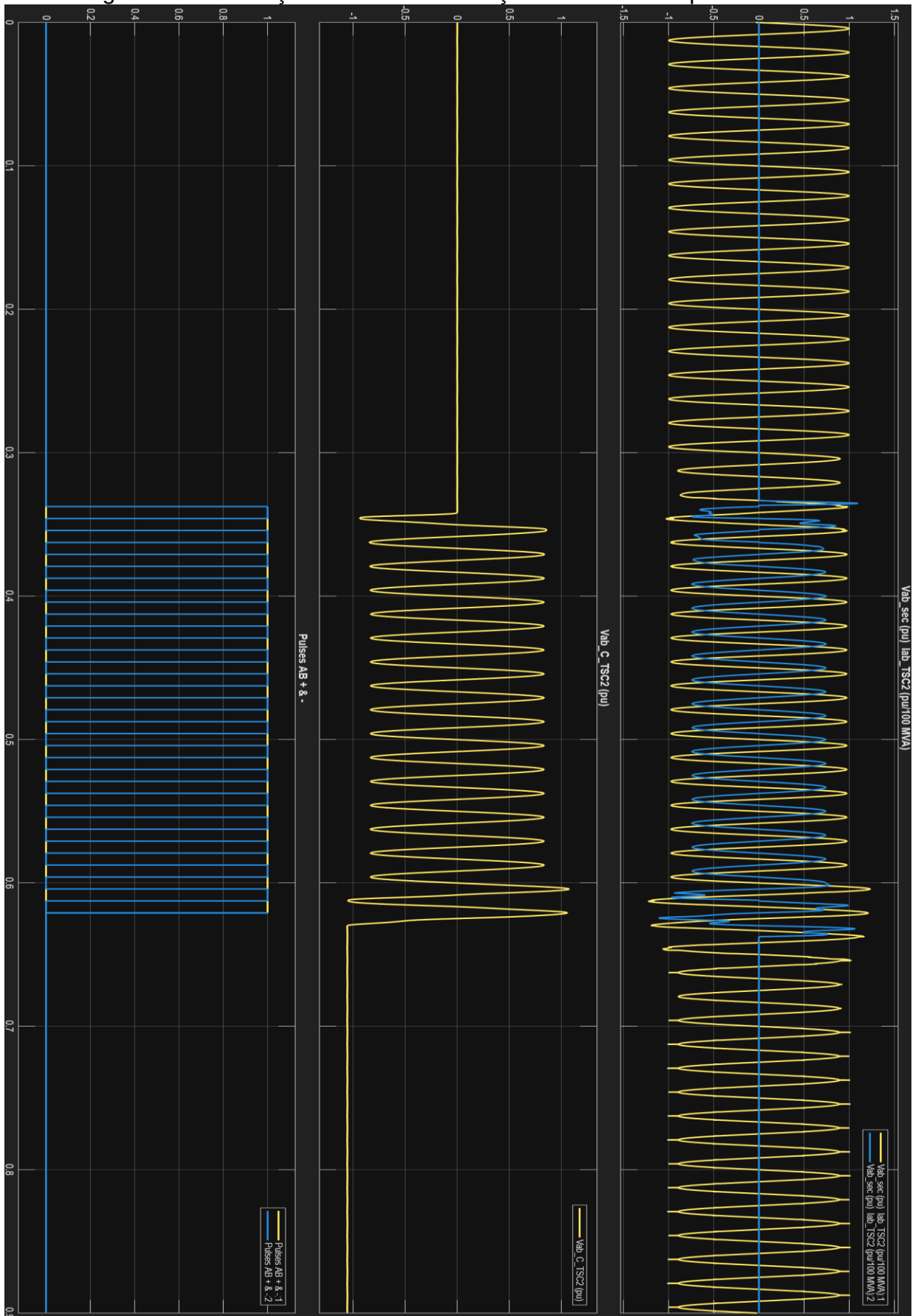
Já na Figura 53, tem-se o caso para o TSC, no qual no instante $t=0,3s$, os TSCs são ligados, para injetar potência reativa, aumentando a tensão do sistema.

Figura 52 - Simulação no TCR da transição de sobretensão para sobretensão



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 53 - Simulação no TSC da transição de sobtensão para sobretensão



Fonte: Produção do próprio autor.

4.6 CASO 6

Para o sexto caso, inverteu-se a transição do sistema, no qual primeiro ocorre a sobretensão e em seguida a subtensão. Com a finalidade de verificar a rapidez da estabilização da tensão, a limitação do pico da sobretensão, as oscilações ou picos indesejados na tensão quando há a mudança e se a tensão é estabilizada no valor de referência após cada perturbação.

Figura 54 - Dados para o caso 6

Block Parameters: Programmable Voltage Source

Three-Phase Programmable Voltage Source (mask) (link)

This block implements a three-phase zero-impedance voltage source. The common node (neutral) of the three sources is accessible via input 1 (N) of the block. Time variation for the amplitude, phase and frequency of the fundamental can be pre-programmed. In addition, two harmonics can be superimposed on the fundamental.

Note: For "Phasor simulation", frequency variation and harmonic injection are not allowed. Specify Order =1 and Seq=1,2 or 0 to inject additional fundamental components A and B in any sequence.

Parameters Load Flow

Positive-sequence: [Amplitude(Vrms Ph-Ph) Phase(deg.) Freq. (Hz)] [1.004*440e3 0 60]

Time variation of: Amplitude

Type of variation: Table of time-amplitude pairs

☐ Variation on phase A only

Amplitude values (pu): [1.0 1.1 1.1 0.9 0.9]

Time values: [0 0.3 0.4 0.6 0.7]

☐ Fundamental and/or Harmonic generation:

OK Cancel Help Apply

Fonte: Produção do próprio autor.

Verifica-se na Figura 55 que no instante $t=0,3s$, quando ocorre a queda de tensão, a susceptância diminui, configurando a entrada do TCR, bem como a mudança do ângulo α , em que a tensão medida chega à um pico, e abaixa após o TCR entrar, mantendo-se constante por volta de 1,05pu até $t=0,6s$. Após este instante, a tensão diminui, consequentemente, a susceptância aumenta e os TSCs são inseridos, e o ângulo α retorna à 180° , em que a tensão tem um pico e

mantém-se constante acima de 0,95 pu. Verifica-se pela tensão medida, que não houve oscilações, mas ocorreram picos, quando o sistema acionava o TCR e os TSCs.

Figura 55 - Simulação da tensão medida, Susceptância, ângulo de disparo e TSCs acionados da sobretensão para subtensão



Fonte: Produção do próprio autor.

De modo análogo ao quinto caso, neste caso, no instante $t=0,3s$, a corrente é atrasada em relação à tensão, com o SVC absorvendo potência reativa, visto pelo gráfico da potência Q e o ângulo α , Figura 56. Após o instante $t=0,6s$, a corrente é adiantada em relação à tensão, demonstrando que o SVC injeta potência reativa, verificada pelo aumento de Q e o número de TSCs ligados.

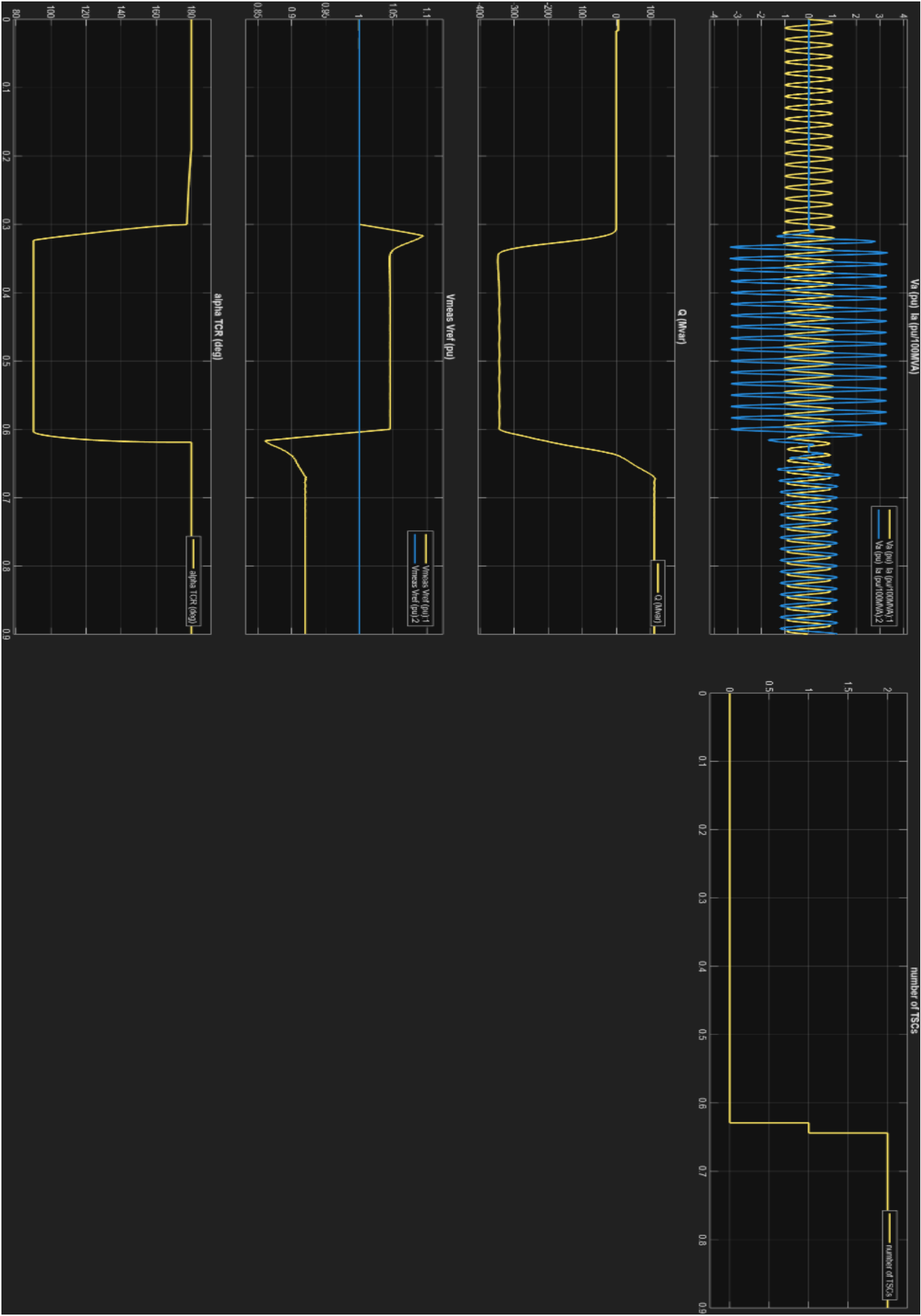
No instante da subtensão, o controle comanda a injeção de reativos, que exige a entrada do banco TSC. Para evitar uma queda de tensão momentânea (uma "fuga" indutiva), a coordenação também é feita em etapas. O TCR é rapidamente desligado (o ângulo α é aumentado em direção a 180°), reduzindo sua absorção indutiva. O TSC é ligado (no momento de zero tensão, para evitar o *inrush*). A injeção capacitiva do TSC compensa a redução da absorção do TCR.

A curva de susceptância total demonstra que a redução da absorção indutiva pelo TCR é quase perfeitamente casada com o aumento da injeção capacitiva do TSC. Isso mantém o controle reativo contínuo, impedindo que a tensão na barra sofra um afundamento excessivo durante a transição. O efeito prático é uma resposta rápida do SVC para injetar a potência reativa necessária, estabilizando a tensão no novo regime de forma amortecida e sem grandes sobre-impulsos ou sub-impulsos.

A Figura 57 apresenta os sinais no TCR, confirmando o funcionamento do SVC no instante em que a tensão aumenta, absorvendo potência reativa, para regular a tensão próxima ao valor de referência.

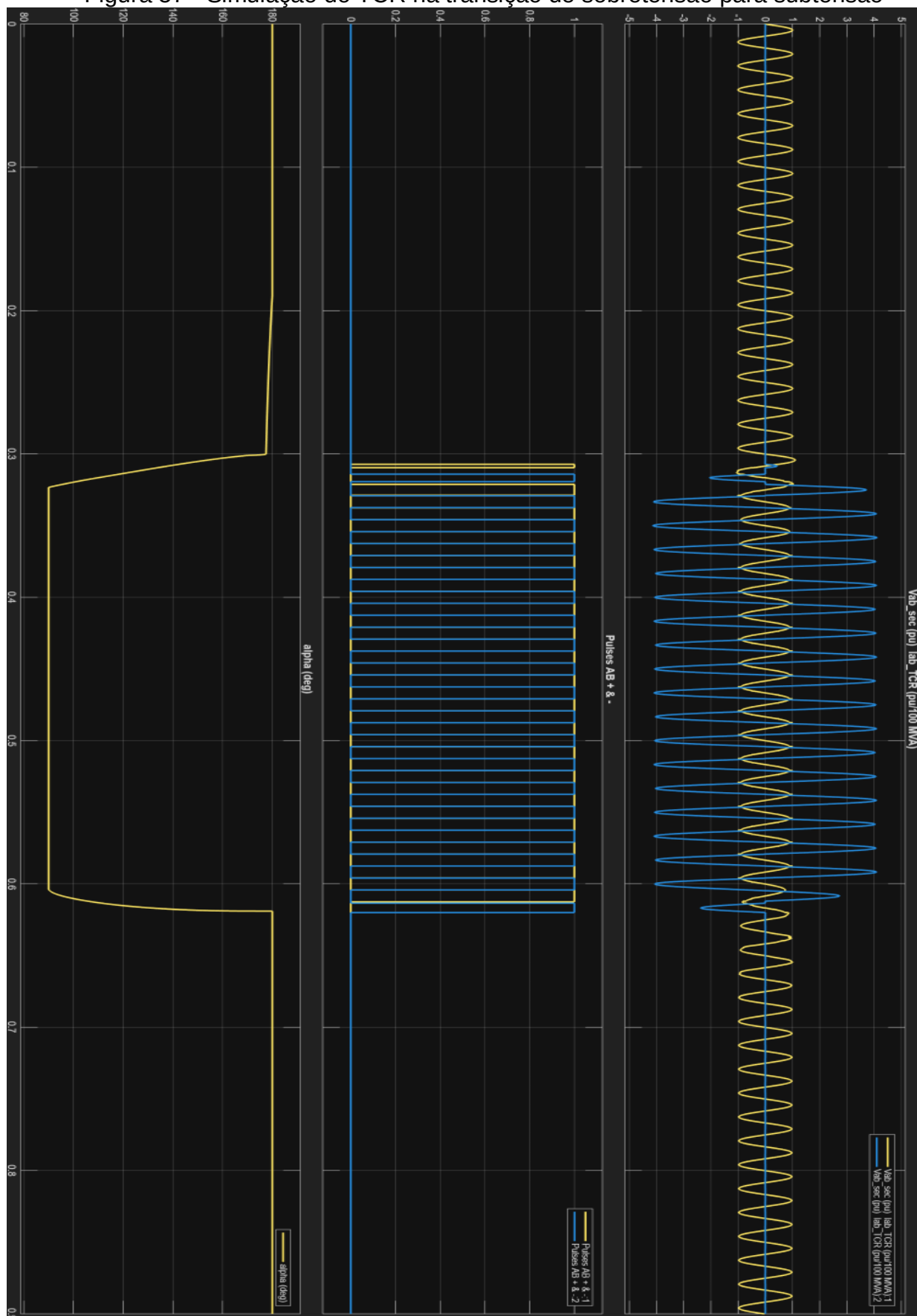
Analogamente ao TCR, a Figura 58 apresenta os sinais do TSC, cuja entrada é verificada no instante após $t=0,6s$, confirmando o que foi analisado para a Figura 57 para injetar potência reativa no sistema.

Figura 56- Simulação da tensão e corrente na fase A, potência reativa, tensão medida, ângulo de disparo e acionamento dos TSCs na transição de sobretensão para subtensão



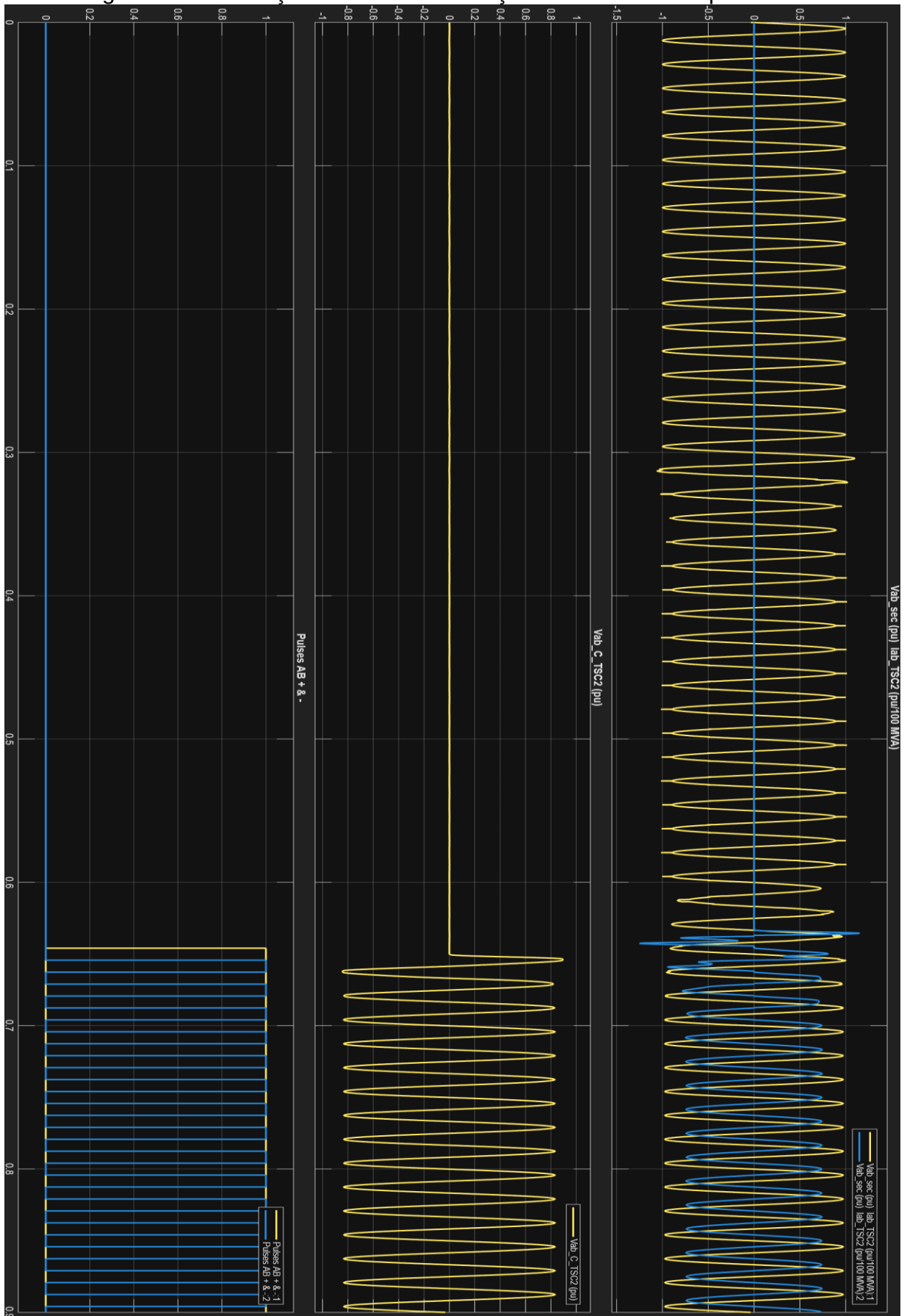
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 57 - Simulação do TCR na transição de sobretensão para subtenção



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 58 - Simulação do TSC na transição de sobretensão para subtensão



Fonte: Produção do próprio autor.

5. CONCLUSÃO

O presente Trabalho de Graduação (TG) teve como objetivo principal realizar um estudo de caso referente ao sistema elétrico com a inserção de um Compensador Estático de Reativos (SVC), com foco na compensação de tensão em sistemas de potência. Este dispositivo é um dos mais cruciais controladores paralelos da tecnologia FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) para o suporte de potência reativa e estabilidade de tensão.

Os objetivos específicos do trabalho, que incluíam o estudo de dispositivos FACTS e SVC, a obtenção de conhecimento em áreas como qualidade de energia e modelagem no MATLAB/Simulink, foram integralmente alcançados. A modelagem do SVC, composta pela combinação de um Reator Controlado a Tiristor (TCR) e Capacitores Chaveados a Tiristor (TSCs), foi realizada com sucesso no ambiente Simulink, simulando seu comportamento em um sistema de 440kV.

A arquitetura de controle do SVC demonstrou-se robusta e eficaz, operando em uma malha de *feedback* fechada. O Regulador de Tensão utilizou um controlador Proporcional-Integral (P-I) para calcular a susceptância total requerida (BSVC), traduzindo-a em comandos de ação contínua (ângulo α para o TCR) e ação discreta (sinais binários para os TSCs) através da Unidade de Distribuição. A Unidade de Disparo garantiu que os pulsos de *gate* fossem emitidos de forma sincronizada, crucial para o controle de fase do TCR e o chaveamento seguro dos TSCs, minimizando transitórios de corrente.

Os resultados das simulações, expostos no Capítulo 4, confirmaram a eficácia do SVC na regulação dinâmica da tensão frente a diversas perturbações, validando o modelo proposto:

- Queda de Tensão (Subetensão - Casos 1 e 2): Em cenários de queda de tensão, o SVC demonstrou uma resposta rápida através do acionamento dos TSCs, injetando potência reativa capacitiva (BSVC positivo) para recuperar a tensão do barramento. Observou-se que, para quedas mais acentuadas, o disparo dos TSCs foi ainda mais rápido. O TCR não foi acionado, pois sua função de absorção indutiva não era necessária para esta correção.
- Aumento de Tensão (Sobretensão - Casos 3 e 4): Em situações de sobretensão, o SVC utilizou o TCR para absorver potência reativa indutiva (BSVC negativo), com o ângulo de disparo (α) tendendo a 90° para máxima

absorção. Esta ação resultou no atraso da corrente em relação à tensão, característico da absorção reativa, e foi eficaz em retornar a tensão para o valor de referência rapidamente.

- Transitórios Complexos (Casos 5 e 6): O SVC demonstrou alta capacidade de transição entre regimes operacionais extremos. Nos casos de transição de subtensão para sobretensão (Caso 5) e vice-versa (Caso 6), o SVC mudou rapidamente da injeção máxima (TSCs acionados) para a absorção máxima (TCR acionado) ou o inverso. Embora tenham ocorrido pequenos picos transitórios durante a ativação dos componentes, o sistema demonstrou estabilidade e rapidez na recuperação da tensão após cada perturbação.

Desse modo, a simulação demonstrou que o Compensador Estático de Reativos é uma solução robusta e dinâmica para controle da potência reativa e o controle rápido e preciso da tensão em seu ponto de conexão, mitigando os desafios impostos por grandes variações no sistema elétrico. O projeto e a modelagem detalhada no Simulink não apenas validaram a teoria e a funcionalidade do SVC, mas também cumpriram o objetivo de fornecer uma ferramenta de análise para o estudo da estabilidade do sistema frente a transitórios.

Para trabalhos futuros, foram identificados temas e tópicos que não fazem parte do foco deste trabalho, portanto, não foram desenvolvidos, mas podem ser de interesse para continuidade de estudos relacionados ao tema abordado. Destacam-se:

- Análise comparativa entre o SVC e outros dispositivos FACTS, como STATCOM, avaliando desempenho dinâmico, complexidade de controle e viabilidade econômica em diferentes cenários de rede;
- Estudo da estabilidade do sistema com a variação de carga;
- Estudo de impacto econômico e ambiental, avaliando os benefícios econômicos e ambientais da instalação de SVCs no sistema de potência, visando aspectos como redução de perdas, melhoria na qualidade de energia e sustentabilidade;
- Estudo da integração do SVC em sistemas elétricos com geração distribuída.
- Estudo da otimização dos parâmetros de controle, visando melhorar a resposta dinâmica e reduzir efeitos transitórios.

REFERÊNCIAS

ASARE, P.; DIEZ, T.; GALLI, A.; O'NEILL-CARILLO, E.; ROBERTSON, J.; ZHAO, R. An overview of Flexible AC Transmission Systems. ECE Technical Reports. Paper 205. Indiana, EUA, 1994.

HINGORANI, N. G.; LASZLO, G. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. IEEE. Nova Iorque, EUA, 2000.

KUNDUR, P. POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL. McGraw- Hill, Nova Iorque, EUA, 1994.

MACHADO, R. L. Aplicação de dispositivos FACTS no sistema de transmissão da Eletrosul. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. THYRISTOR-BASED FACTS CONTROLLERS FOR ELECTRICAL TRANSMISSION SYSTEMS. IEEE. Nova Iorque, EUA, 2002.

MOHANTY, A.K.; BARIK, A.K. Power System Stability Improvement Using FACTS Devices. International Journal of Modern Engineering Research. Vol. 1, Issue 2, pp-666-672.

NATURESA, J.S. A influência de compensadores estáticos de reativos na estabilidade de tensão de sistemas de energia elétrica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.

NDT Resource Center. Circuits and Phase. Disponível em: <https://www.nde-ed.org/Physics/Electricity/parallelcircuit.xhtml>. Acesso em: 30 ago. 2025.

SAMESIMA, M.I. Compensadores estáticos de reativos e de desequilíbrios em sistemas elétricos de potência. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 1984.

SAUER, P.W. Reactive power and voltage control issues in electric power systems. University of Illinois. Urbana-Champaign, 2005.

TOMIM, M.A.; Análise de estabilidade em regime permanente de sistemas elétricos susceptíveis a ressonância subsíncrona. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2004;

WATANABE, E.H.; AREDES, M. Teoria de potência ativa e reativa instantânea e aplicações – Filtros Ativos e FACTS. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

WATANABE, E.H.; BARBOSA, P.G.; ALMEIDA, K.C; TARANTO, G.N. Tecnologia FACTS – Tutorial. SBA Controle e Automação Vol. 9 N. 1. 1998.