

unesp



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**APLICAÇÃO DA TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA
INSTANTÂNEA NA ANÁLISE E ESTIMAÇÃO DE
PARÂMETROS DA MÁQUINA SÍNCRONA EM
CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS**

JOÃO PIRES DE MORAES

Ilha Solteira - SP

1210001547



unesp

UNIVERSIDADE ESTUDUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**APLICAÇÃO DA TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA
INSTANTÂNEA NA ANÁLISE E ESTIMAÇÃO DE
PARÂMETROS DA MÁQUINA SÍNCRONA EM
CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS**

João Pires de Moraes

Orientador: Prof. Dr. Dalgerti Lelis Milanese

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de concentração em Sistemas Elétricos.

ILHA SOLTEIRA
Estado de São Paulo
2005

Proc. 055/05 - NDD 025

UNESP - "CAMPU ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCN. DE BIBLIOTEC. E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
10.03.05	30.04.05
REGISTRADO POR	TOMBO
Ailza	Te. 1547
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Wloazat Autor R\$10.00	M827a



30404002

FICHA CATALOGRÁFICA

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

Moraes, João Pires de
M827a Aplicação da teoria da potência complexa instantânea na análise e estimação de parâmetros da máquina síncrona em condições transitórias / João Pires de Moraes . -- Ilha Solteira : [s.n.], 2005
113p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de concentração em Sistemas Elétricos, 2005

Orientador: Dalgerti Lelis Milanese
Bibliografia: p. 105-107

1. Potência complexa instantânea. 2. Transitórios (Eletricidade). 3. Máquinas elétricas síncronas. 4. Relés elétricos.

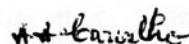
Co sup 295582
sup 58731

Aplicação da Teoria da Potência Complexa Instantânea na Análise e Estimação de Parâmetros da Máquina Síncrona em Condições Transitórias

João Pires de Moraes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

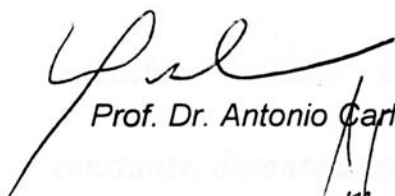
COMISSÃO EXAMINADORA:



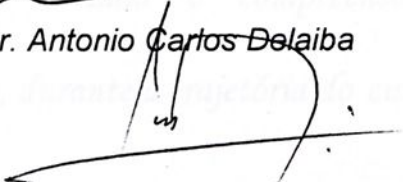
Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica



Prof. Dr. Dalgerti Lelis Milanese – orientador



Prof. Dr. Antonio Carlos Delaiba



Prof. Dr. Luis Carlos Origa de Oliveira

Ilha Solteira-SP, janeiro de 2005.

BCpIS - FEIS - UNESP



Aos meus pais, Geraldo (In memoriam) e Luzia

Aos meus irmãos, Antônio e Ana

Aos meus sobrinhos

Dedico

*À minha esposa Adriana pela paciência, carinho,
amizade, solidariedade e companheirismo nos momentos
difíceis da minha jornada.*

*Aos meus filhos Narayana (In memoriam), Tiago,
Linayana , Laíse e a enteada Maria Adriana pelo apoio,
incentivo, carinho e compreensão da minha ausência
constante, durante a trajetória do curso.*

Ofereço.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Dalgerti Lelis Milanese, pela orientação segura, dedicação, apoio, compreensão, incentivo, e acima de tudo pelo respeito e amizade.

A UNESP - Universidade Estadual Paulista, “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira, pela oportunidade.

A Universidade de Rio Verde, FESURV, na pessoa do Reitor Paulo Eustáquio Resende do Nascimento, pelo apoio e suporte financeiro.

A coordenação do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica, através dos professores Dr Antônio Padilha Feltrin e Dr. Aparecido Augusto de Carvalho.

A secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, através dos seus funcionários, pela competência, amizade, dedicação e atenção.

Aos bibliotecários da UNESP, Ilha Solteira, pela atenção, dedicação e ajuda na revisão das referências bibliográficas e catalogação deste material.

Aos professores e funcionários da Universidade de Rio Verde, FESURV, pela amizade e companheirismo.

Aos professores e funcionários do Departamento de Pós-Graduação da Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista, UNESP de Ilha Solteira.

Aos colegas da Pós-Graduação, Mirelly, Ricardo Duarte, Ricardo Moura, Alexandre, Marco Antônio, pelas ajudas trocadas, pelo respeito, amizade e convivência durante o curso.

Aos amigos e colegas de trabalho Célio, José Marcos, Tércio e Élis, pelas “caronas”, pelo companheirismo e apoio quando juntos estivemos durante o curso.

As pessoas que além de acreditarem no meu empenho, respeitosamente, incentivaram e colaboraram de uma forma ou de outra na realização desta jornada.



RESUMO

Foi desenvolvida neste trabalho, uma técnica aplicável a circuitos trifásicos, através da teoria da Potência Complexa Instantânea, que delineou novos conceitos de Potência Elétrica, defendida por "Milanez". Esta teoria além da máquina síncrona aplica-se também aos relés de distâncias e aos diagramas de círculo que são fundamentais aos sistemas elétricos de potência.

O resultado desta aplicação poderá ser útil para a determinação de parâmetros "on-line" ou em tempo real, de cargas lineares e não-lineares, com possíveis aplicações às máquinas elétricas. Caso a carga não tenha parâmetros RL (ou RC), mas, uma combinação destas grandezas e ainda fontes internas, o método poderá ser utilizado para determinarem-se os parâmetros RL (ou RC) equivalentes.

Os resultados das simulações são comparados aos valores obtidos através dos cálculos realizados para sistema trifásico onde serão observados o comportamento e desempenho da máquina como motor ou alternador. Entretanto, a obtenção precisa dos parâmetros ainda em fase de estudo é uma aspiração, não apenas dos construtores de máquinas elétricas, mas também dos projetistas de sistemas e dispositivos relativos à máquina elétrica.

Palavras-chave: Potência complexa instantânea; transitórios; máquina síncrona; diagramas de círculo; relés digitais.

ABSTRACT

It was developed in this work, an applicable technique to three-phase circuits, through the theory of the Instantaneous Complex Power, that it delineated new concepts of Electric Power, defended by "Milanez". This theory besides the synchronous machine, is also applied to the relays of distances and the circle diagrams that are fundamental to the electric systems of power.

The result of this application can be useful for the "on-line" determination of parameters or in real time, of lineal and no-lineal loads, with possible applications to the electric machines. In case the load doesn't have parameters RL (or RC), but, a combination of these greatness and still internal sources, the method can be used to determine the parameters RL (or RC) equivalent.

The results of the simulations are compared to the values obtained through the calculations accomplished for three-phase system where the behavior and acting of the machine will be observed as motor or alternator. However, the obtaining needs the parameters still in study phase it is an aspiration, not just of the builders of electric machines, but also of the planners of systems and relative devices to the electric machine.

Key word: Instantaneous complex power; transients; synchronous machine; diagrams of circle; digital relays.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração	Página
Capítulo II:	
Figura II.1 - Representação dos vetores instantâneos girantes $\tilde{V}$ e $\tilde{I}$, no plano α - β complexo	22
Figura II.2 - Representação dos vetores espaciais instantâneos, $\tilde{V}$ e $\tilde{I}$ no plano α - β	23
Figura II.4 - Decomposição do vetor espacial instantâneo $\tilde{I}$, na direção do vetor $\tilde{V}$ e em quadratura com este.....	26
Figura II.5 – Circuito elétrico RL equivalente para um modelo simples da máquina síncrona.....	34
Capítulo III:	
Figura III.1 - Diagrama equivalente de uma Linha de Transmissão trifásica com dois pares de terminais (quadripólo)	37
Figura III.2 - Circuito T assimétrico equivalente para uma Linha de Transmissão, com dois pares de terminais.....	37
Figura III.3 - Diagrama fasorial para um quadripólo que recebe uma corrente $\hat{I}_s$ no barramento transmissor.....	39
Figura III.4 - Diagrama fasorial de potência no barramento emissor.....	40
Figura III.5 - Circuito equivalente de duas máquinas para demonstração do efeito da oscilação ou saída de sincronismo no relé de operação.....	42
Figura III.6 - Diagrama vetorial para o circuito do sistema de duas máquinas.....	43
Figura III.7 - Lugar Geométrico da Impedância r vista pelo Relé durante oscilações ou saída de sincronismo no sistema de duas máquinas.....	44
Figura III.8 - Impedância vista pelo Relé durante condição normal de carga, oscilação, saída de sincronismo, Curto-circuito e características de disparo do Relé de Impedância.....	46

Capítulo IV:

Figura IV.1 - Circuito equivalente da máquina síncrona.....	50
Figura IV.2 - Diagrama fasorial da condição de operação da máquina:	
(a) fator de potência adiantado (b) fator de potência atrasado.....	51
Figura IV.3 - Característica Potência-ângulo da Máquina Síncrona.....	52
Figura IV.4 - Diagrama de blocos do sistema mecânico da máquina.....	57
Figura IV.5 – Circuito representativo de uma linha de transmissão curta e da máquina síncrona.....	57
Figura IV.6 - Circuito elétrico equivalente fase <i>a</i> para este modelo de máquina.....	59
Figura IV.7- Diagrama de blocos do sistema elétrico – fase <i>a</i>	60
Figura IV.8 - Circuito elétrico equivalente fase <i>b</i> para este modelo de máquina.....	60
Figura IV.9 - Diagrama de bloco do sistema elétrico – fase <i>b</i>	62
Figura IV.10 - Circuito elétrico equivalente fase <i>c</i> para este modelo de máquina.....	62
Figura IV.11 - Diagrama de blocos o sistema elétrico – fase <i>c</i>	64
Figura IV.12 – Diagrama de Blocos completo.....	65

Capítulo V:

Figura V.1 – Tensão na fase <i>a</i> em função do tempo, no barramento infinito.....	68
Figura V.2 – Trajetória do vetor espacial instantâneo tensão na barra infinita.....	68
Figura V.3 – Variação do ângulo de carga em função do tempo.....	69
Figura V.4 – Variação do torque eletromagnético em função do tempo.....	70
Figura V.5 – Variação da Corrente elétrica na fase <i>a</i> em função do tempo.....	70
Figura V.6 – Variação da Corrente elétrica na fase <i>b</i> em função do tempo.....	71
Figura V.7 – Variação da Corrente elétrica na fase <i>c</i> em função do tempo.....	71
Figura V.8 – Trajetória do vetor espacial instantâneo corrente.....	72
Figura V.9 – Trajetória do vetor espacial instantâneo corrente para um sistema de referência girando à velocidade síncrona.....	73
Figura V.10 – Variação do módulo do vetor espacial instantâneo corrente.....	74
Figura V.11 – Variação da potência complexa instantânea.....	74
Figura V.12 - Variação potência real em função da do tempo.	75
Figura V.13 – Variação da potência imaginária em função do tempo.....	76
Figura V.14– Variação da potência magnética em função do tempo.....	76

Figura V.15 - Curva representativa das Potências Real e Imaginária da Máquina Síncrona em função do Ângulo de Potência.	77
Figura V.16 – Variação da impedância equivalente instantânea.	78
Figura V.17 – Variação do vetor espacial instantâneo corrente para as várias relações de tensão.	80
Figura V.18 – Variação da Potência Complexa Instantânea.	81
Figura V.19– Impedância Equivalente Z_{eq} para as várias relações de tensão na máquina síncrona.	81
Figura V.20– Variação da Indutância na variação do torque de carga em função do tempo.	82
Figura V.21 – Variação do Ângulo de carga em cada etapa do processo transitório devido à variação da carga, em função do tempo.	84
Figura V.22 – Variação do Torque eletromagnético nos transitórios de variação de carga em função do tempo.	85
Figura V.23 – Variação da Potência complexa instantânea.	87
Figura V.24 – Variação da Potência Ativa em função do tempo.	89
Figura V.25– Variação da Potência Imaginária em função do tempo.	90
Figura V.26 – Variação da energia magnética armazenada em função do tempo.	91
Figura V.27 - Variação do módulo da Corrente Complexa Instantânea em função do tempo.	91
Figura V.28 – Variação do VEI corrente com Ângulo inicial constante e torque variável.	92
Figura V.29 – Potencias Real e Imaginária em função do ângulo de carga.	93
Figura V.30 - Circuito elétrico equivalente para as três fases da linha de transmissão em curto-circuito franco trifásico.	94
Figura V. 31- Diagramas de blocos representando as três fases da linha de transmissão.	95
Figura V.32 – Trajetória do VEI corrente durante o curto-circuito franco trifásico	96
Figura V.33 – Variação da Indutância de curto-circuito em função do tempo.	96
Figura V.34 – Variação da potência magnética de curto-circuito em função do tempo.	97
Figura V.35 – Variação da potência ativa consumida nas resistências	

do circuito durante o curto-circuito em função do tempo.....	98
Figura V.36 – Variação da potência complexa Instantânea de curto-circuito.....	98
Figura V.37 – Variação da resistência elétrica de curto-circuito em função do tempo.....	99
Figura V.38 – Módulo da impedância da linha de transmissão durante o curto-circuito.....	99
Figura V.39 - Impedância equivalente transitória durante curto-circuito.....	100

Apêndice A:

Figura A.1 - Diagrama de Circulo representativo da Potência Complexa Instantânea para uma Máquina Síncrona durante a Sincronização.....	112
--	-----

Apêndice B:

Figura B.1 - Transformação das coordenadas de potência em corrente na variação da Potência complexa instantânea.....	114
---	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

V :	Amplitude de tensão
I :	Amplitude de corrente
P :	Potência ativa convencional
Q :	Potência reativa convencional
S :	Potência aparente convencional
$\tilde{V}$:	Vetor espacial instantâneo girante tensão
$\tilde{I}$:	Vetor espacial instantâneo girante corrente
$\dot{V}$:	Amplitude complexa do vetor espacial instantâneo girante tensão-fasor
$\dot{I}$:	Amplitude complexa do vetor espacial instantâneo girante corrente-fasor
V_{α} :	Decomposição do vetor $\tilde{V}$ no plano α
V_{β} :	Decomposição do vetor $\tilde{V}$ no plano β
I_{α} :	Decomposição do vetor $\tilde{I}$ no plano α
I_{β} :	Decomposição do vetor $\tilde{I}$ no plano β
P_P :	Potência real
P_Q :	Potência imaginária
$\tilde{S}$:	Potência complexa instantânea
$P_{P\alpha}$:	Potência ativa instantânea na fase α
$P_{P\beta}$:	Potência ativa instantânea na fase β
$P_{Q\alpha}$:	Potência reativa instantânea na fase α
$P_{Q\beta}$:	Potência reativa instantânea na fase β
ω_v :	Velocidade angular do vetor $\tilde{V}$
ω_i :	Velocidade angular do vetor $\tilde{I}$
FPI:	Fator de potência instantâneo
X :	reatância síncrona
δ :	ângulo medido de V para E , em rad
E :	f.e.m. desenvolvida na máquina
G :	Potência nominal da máquina
GH :	Energia cinética no eixo da máquina

H :	Constante de inércia da máquina
T_E :	Torque eletromagnético da máquina
T_L :	Torque de carga no eixo da máquina
J :	Momento de inércia das partes girantes da máquina;
D :	Coeficiente de amortecimento, incluído o amortecimento elétrico;
ω_M :	Velocidade angular do rotor.
ω_S :	Velocidade angular síncrona
R :	Resistência da linha
L :	Indutância mútua da linha
L_m :	Indutância mútua da máquina
L_S :	Indutância síncrona da máquina
P_E :	Potência elétrica desenvolvida na máquina
P_M :	Potência mecânica no eixo da máquina
P_{mec} :	Potência mecânica de saída da máquina
f :	Frequência elétrica da máquina em c.p.s
$S_{3\phi_b}$:	Potência aparente trifásica
$\tilde{I}_P$:	Decomposição do vetor $\tilde{I}$ em fase com o vetor $\tilde{V}$
$\tilde{I}_Q$:	Decomposição do vetor $\tilde{I}$ em quadratura com o vetor $\tilde{V}$
$\mathcal{E}_m$:	Energia magnética
δ_f :	Ângulo de potência no final do transitório
α_v :	Ângulo entre o vetor espacial girante tensão e o plano α
α_i :	Ângulo entre o vetor espacial girante corrente e o plano α
$ \tilde{V} $:	Módulo do vetor espacial instantâneo tensão
$ \tilde{I} $:	Módulo do vetor espacial instantâneo corrente

ÍNDICE

Capítulo	Página
I	
Introdução:.....	16
II.	
Teoria da Potência Complexa Instantânea:.....	19
II.1.	
Vetores Espaciais Instantâneos:.....	20
II.1.1.	
Vetores Representativos de Tensão e Corrente nos Circuitos de Corrente Alternada em Regime Senoidal:.....	20
II.1.2.	
Vetores Tensão e Corrente em Sistemas Trifásicos Sem o Condutor Neutro em Regime Permanente Não-senoidal ou Transitório.....	22
II.2.	
A Potência Complexa Instantânea:.....	25
II.3.	
Um Novo Conceito de Potência Elétrica:.....	32
III	
Monitoração, Análise e Proteção de Linhas de transmissão:.....	35
III.1	
Diagramas de Círculo de uma Linha de Transmissão:.....	35
III.2.	
Construção de Diagramas de Círculo para o Barramento Transmissor	38
III.3.	
Relés de Distância:.....	41
IV.	
Modelagem, Simulação e análise de transitórios da máquina síncrona:	47
IV.1.	
A máquina Síncrona:.....	47
IV.1.1.	
Transitório Eletro-mecânico na Máquina Síncrona:.....	47
IV.2.	
Modelagem e Simulação da Máquina Síncrona.....	53
IV.2.1.	
Parâmetros da Máquina Síncrona e Condições Iniciais de Operação.....	54
IV..2.2.	
Equacionamento do Sistema Elétrico para Desenvolvimento das Simulações.....	57
IV.2.3.	
Equações de Tensão para as Três Fases.....	58
IV.2.4	
Diagrama de blocos completo:.....	64
V.	
Resultados da Simulação da Máquina Síncrona.....	66



V.1. Análise do Transitório Eletromecânico Durante o Processo de Sincronização da Máquina ao Sistema de Potência.....	66
V.2. Análise de Transitórios Eletromecânicos para Várias Relações de Tensões de Entrada e Saída da Máquina Síncrona:	78
V.3. Diagramas de Círculo da Máquina Síncrona para Vários Valores de Carga.....	81
V.4. Curto-circuito trifásico:.....	92
VI. Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros:.....	100
Referências Bibliográficas:.....	103
Apêndices:.....	105
Apêndice – A: Utilização do Diagrama de Círculo na Determinação dos Parâmetros da Máquina Síncrona.....	105
Apêndice – B: Obtenção do diagrama de círculo para corrente.....	109

I. Introdução

Explora-se neste trabalho a aplicação da teoria da Potência Complexa Instantânea e de vetores espaciais instantâneos como possíveis ferramentas para monitoração, análise e proteção de sistemas elétricos de potência.

Para tanto, utiliza-se o método de diagramas de círculos que permite uma análise gráfica da variação de grandezas tais como tensões, correntes e potências em função da variação de certos parâmetros dos sistemas elétricos de potência.

Demonstra-se que os vetores espaciais instantâneos permitem o levantamento em tempo real desses diagramas para casos de dinâmica semelhante ao sistema estudado. Demonstração esta que, por outro lado, melhor conceitua a natureza desses vetores. Conclui-se que os mesmos, em certas circunstâncias, podem ser interpretados como fasores convencionais e, desta forma, o sistema durante transitórios pode ser considerado como estando em regime permanente senoidal, para cada ponto considerado nas curvas dos diagramas de círculo traçadas.

As potências real e imaginária reduzem-se às potências ativa e reativa convencionais, nestes casos.

Para levar a efeito este estudo, optou-se pela utilização de um modelo simplificado da máquina síncrona, operando como motor, durante o processo de sincronização desta ao sistema, através de uma linha de transmissão curta representada pela sua impedância série. O sistema foi considerado como sendo constituído de um barramento infinito.

Com a variação da carga, representada pelo ângulo de carga da máquina, obtém-se o traçado desses círculos, da forma prevista pela teoria.

Em relação à aplicação da teoria à proteção, explorou-se a utilização dos vetores espaciais instantâneos na construção de diagramas de impedância, analisando-se os resultados com base na teoria dos relés de impedância.

O trabalho apresenta-se na seguinte ordem:

No capítulo II é feito um estudo dos fundamentos teóricos da Teoria da Potência Complexa Instantânea com referências aos vetores espaciais instantâneos, tensão e corrente, um breve comentário sobre os regimes permanentes senoidais e não-senoidais e transitórios, representação das equações pertinentes ao capítulo e finalmente é apresentado um novo conceito de Potência Elétrica.

No capítulo III estudam-se os Diagramas de Círculo em linhas de transmissão, que servirá como suporte para aplicação para a aplicação destes diagramas para a máquina síncrona. Com a aplicação da teoria da potência instantânea será mostrada a construção dos diagramas de círculo para a máquina síncrona. Também, neste capítulo faz-se resumo teórico dos Relés de Distância cujas características serão traçadas durante o processo de simulação utilizando-se o conceito de Vetores Espaciais Instantâneos.

O capítulo IV apresenta a simulação e análise de transitórios da máquina síncrona, a Equação Swing da máquina síncrona com o desenvolvimento de uma série de equações que farão parte dos cálculos que serão comparados com os resultados obtidos através de simulações. É feita uma modelagem para esta máquina que será representada através de um algoritmo em diagrama de blocos que constará de um software desenvolvido através do Matlab-Simulink.

Também neste capítulo é apresentada a modelagem da máquina síncrona onde são atribuídos os valores dos parâmetros e das variáveis envolvidas no processo. São apresentados os diagrama de blocos com os algoritmos para a simulação digital do

comportamento da máquina síncrona para a determinação dos resultados obtidos no processo da simulação.

No capítulo V serão apresentados os resultados provenientes da simulação, onde será mostrada a máquina síncrona operando a plena carga, a análise de transitórios eletromecânicos, a obtenção dos diagramas de círculos para potência e correntes e um estudo comparativo da máquina síncrona com um curto-circuito trifásico. A abordagem mostra uma forma de emprego da teoria da potência complexa instantânea e os resultados obtidos são apresentados através de valores numéricos e gráficos demonstrando o comportamento do sistema estudado.

E, finalmente, no capítulo VI apresenta-se a conclusão e as sugestões para trabalhos futuros, deixando, portanto, elementos que servirão como ponto de apoio para futuras pesquisas que poderão utilizá-los no ensino e na pesquisa para construir novos conceitos técnicos e contribuir com estudos científicos e pesquisas.

No apêndice A, apresenta-se o diagrama de círculo na determinação dos parâmetros da máquina síncrona, utilizando como objeto de comparação no estudo, uma linha de transmissão curta tipo T ou π equivalente.

No apêndice B, apresenta-se o digrama de círculo para obtenção da corrente no circuito da máquina. Nesta aplicação, faz-se uma mudança de escala no gráfico de potência, transformando-o em um gráfico de tensão-corrente e, finalmente um gráfico de potência torna-se num gráfico de corrente.



II. Teoria da Potência Complexa Instantânea

A Teoria da Potência Complexa Instantânea recebe esta denominação por apresentar a potência complexa instantânea como uma extensão do conceito da potência complexa convencional, porém como uma grandeza variável no tempo e aplicável a sistemas elétricos trifásicos a três condutores em quaisquer condições de operação.

Baseia-se na aplicação de vetores espaciais instantâneos, e não nos fasores convencionais da teoria de circuitos elétricos para regimes permanentes senoidais. Estes vetores são grandezas utilizadas na análise de transitórios de máquinas elétricas de corrente alternada e encontram-se na literatura técnica-científica com mais frequência a partir da apresentação das técnicas de controle vetorial desenvolvidas por Hasse [1] e Blaschke [2] na década de setenta.

Milanez [3] e Nabae [4] demonstraram que a teoria da potência reativa instantânea de Akagi [5], na forma que foi por este apresentada, pode ser desenvolvida a partir da teoria de Potência Complexa Instantânea, considerando, para isto, as variáveis elétricas não na forma complexa polar mas em termos de suas componentes cartesianas, e as expressões de corrente e de potência escritas na forma matricial. Desta forma, estas teorias diferenciam-se apenas pela forma de apresentação.

É importante ressaltar a utilização de grandezas vetoriais complexas na aplicação da Teoria da Potência Complexa Instantânea, o que a torna mais bem ilustrada graficamente no plano complexo.

A título de um resumo bibliográfico [1-5], apresentam-se neste capítulo os conceitos da Potência Complexa Instantânea e suas componentes e os conceitos de vetores espaciais instantâneos.



II.1. Vetores Espaciais Instantâneos (VEIs)

Mostram-se, nas duas seções a seguir, a utilização dos vetores girantes convencionais para a representação de grandezas elétricas em circuitos monofásicos, e dos vetores espaciais instantâneos para a representação dessas grandezas em circuitos trifásicos, sem o condutor neutro, operando em quaisquer condições.

II.1.1. Vetores Representativos de Tensão e Corrente nos Circuitos de Corrente Alternada em Regime Permanente Senoidal

Como ponto de partida para o entendimento dos vetores espaciais instantâneos considere-se os vetores girantes convencionais que representam as componentes básicas, tensão e corrente dos circuitos monofásicos em regime permanente senoidal, na forma exponencial complexa, em função do tempo no plano complexo α - β .

O vetor girante convencional que representa a tensão em um circuito monofásico de corrente alternada senoidal define-se da seguinte forma:

$$\tilde{V} = \dot{V} e^{j\omega t} \quad (\text{II-1})$$

da mesma forma, para a corrente tem-se:

$$\tilde{I} = \dot{I} e^{j\omega t} \quad (\text{II-2})$$

sendo $\dot{V} = \sqrt{2} V e^{j\phi_v}$

e $\dot{I} = \sqrt{2} I e^{j\phi_I}$

Como características próprias desses vetores, destacam-se suas amplitude e velocidade angular constantes. Projetando-se então, os referidos vetores representados pelas equações (II-1) e (II-2) no eixo real, obtêm-se as expressões dos seus valores instantâneos que são funções senoidais do tempo.

Tendo-se para a tensão:

$$v = \sqrt{2} V \cos(\omega t + \phi_V) \quad (\text{II-3})$$

e para a corrente:

$$i = \sqrt{2} I \cos(\omega t + \phi_I) \quad (\text{II-4})$$

as amplitudes complexas $\dot{V}$ e $\dot{I}$ são denominadas fasores.

A figura II.1 mostra os vetores instantâneos girantes, no plano complexo α - β .

Em sistemas trifásicos estes vetores são definidos de forma independente para representar as variáveis tensão e corrente em cada fase.

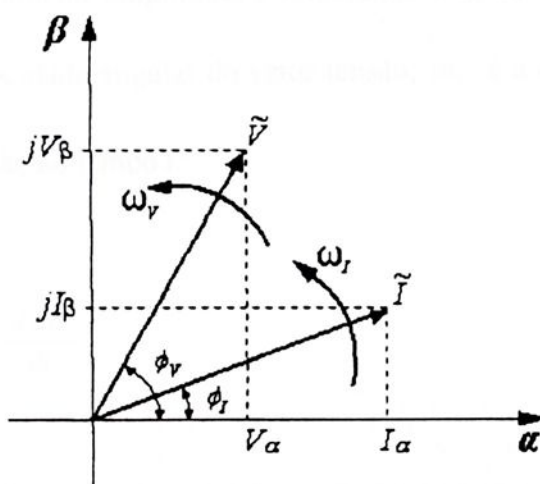


Figura II.1 - Representação dos vetores instantâneos girantes $\tilde{V}$ e $\tilde{I}$, no plano α - β complexo.

II.1.2. Vetores Tensão e Corrente em Sistemas trifásicos Sem o Condutor Neutro em Regime Permanente Não-senoidal ou Transitório

Em sistemas trifásicos sem o condutor neutro, definem-se os chamados Vetores Espaciais Instantâneos os quais são representados no plano complexo $\alpha - \beta$, da seguinte forma:

$$\tilde{V} = |\tilde{V}| e^{j\phi_V} \quad (\text{II-5})$$

$$\tilde{I} = |\tilde{I}| e^{j\phi_I} \quad (\text{II-6})$$

Sendo que possuem geralmente amplitudes e velocidades angulares variáveis no tempo.

A velocidade angular do vetor tensão, ω_V é a derivada do ângulo de fase da tensão, ϕ_V , em relação ao tempo t :

$$\omega_V = \frac{d\phi_V}{dt} \quad (\text{II-7})$$

e a velocidade angular do vetor corrente ω_I é a derivada do ângulo de fase da corrente, ϕ_I , em relação ao tempo t :

$$\omega_I = \frac{d\phi_I}{dt} \quad (\text{II-8})$$

Transformando as equações (II-5) e (II-6) para a forma cartesiana, tem-se as equações (II-9) e (II-10) respectivamente para a tensão e corrente em termos das coordenadas complexas α - β , representadas na figura II.2.

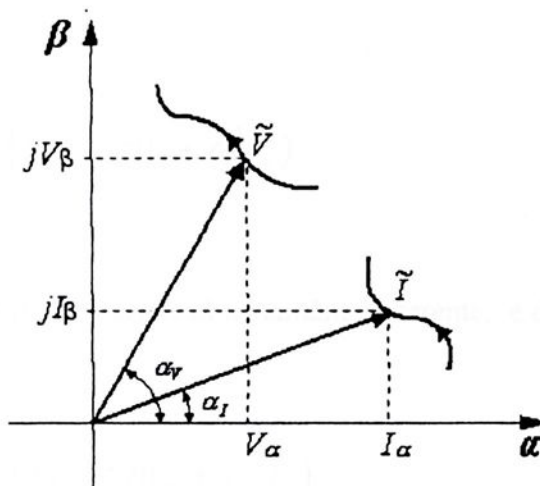


Figura II.2 - Representação dos vetores espaciais instantâneos, $\tilde{V}$ e $\tilde{I}$ no plano α - β .

$$\tilde{V} = V_{\alpha} + jV_{\beta} \quad (\text{II-9})$$

$$\tilde{I} = I_{\alpha} + jI_{\beta} \quad (\text{II-10})$$

e, partindo-se da equação da tensão complexa, obtém-se a tensão real pela equação:

$$v = \text{Real}\{\tilde{V}\} = V_{\alpha} \quad (\text{II-11})$$

de forma análoga, obtém-se a corrente real pela equação:

$$i = \text{Real}\{\tilde{I}\} = I_{\alpha} \quad (\text{II-12})$$

Em uma análise matemática feita em relação às funções derivação e integração, deve-se observar que suas amplitudes e ângulos variam em função do tempo.

Estes vetores são obtidos das grandezas de fase da seguinte forma:

Define-se o vetor espacial instantâneo tensão, pela equação:

$$\tilde{V} = \frac{2}{3}(v_a + av_b + a^2v_c) \quad (\text{II-13})$$

e, de modo semelhante, o vetor espacial instantâneo corrente, é definido pela equação:

$$\tilde{I} = \frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c) \quad (\text{II-14})$$

sendo

v_a, v_b e v_c e i_a, i_b e i_c as tensões e as correntes nas fases a, b e c , respectivamente, e

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = 1 \angle \frac{2\pi}{3} \quad \text{um operador complexo unitário.}$$

Observando-se cada um dos termos do membro direito das expressões II-13 e II-14, verifica-se que são formados pela multiplicação de uma grandeza escalar por uma grandeza complexa resultando, portanto, em uma outra grandeza complexa as quais são representadas por vetores no plano complexo nas direções dadas por a^0, a e a^2 . Estas direções podem determinar as posições dos eixos dos enrolamentos das fases a, b e c de uma máquina elétrica trifásica. O resultado da somas vetoriais indicadas serão vetores que representam respectivamente as tensões e correntes nestas três fases, observando-se que estas últimas podem ser recuperadas pelas projeções dos mesmos em cada direção respectiva. Considerando-se a mesma operação em termos de forças magnetomotrizes ou fluxos magnéticos, obtêm-se os vetores girantes que determinam o chamado campo girante das máquinas trifásicas de corrente alternada. Daí a denominação de vetores espaciais instantâneos por serem estes últimos grandezas temporais e espaciais.

II. 2. A Potência Complexa Instantânea

Define-se a potência complexa instantânea, $\tilde{S}$, no plano α - β , para um sistema trifásico, sem o condutor neutro, pelo produto do vetor espacial instantâneo tensão $\tilde{V}$, e o conjugado do vetor corrente $\tilde{I}$, dado pela equação (II-5)

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \tilde{V} \tilde{I}^* \quad (\text{II-15})$$

Sendo que os vetores tensão e corrente são dados respectivamente pelas equações (II-13) e (II-14).

Suas representações gráficas são mostradas na Figura II.3. Observa-se que Milanez [03] e Nabae [04] decompõem o vetor corrente em suas componentes em fase e em quadratura com o vetor tensão; sendo que estas componentes estão relacionadas respectivamente às potências real e imaginária as quais são definidas a seguir:

Define-se a potência real como sendo a parte real da potência complexa instantânea $\tilde{S}$ como mostra a expressão:

$$P = \text{Real}\{\tilde{S}\} \quad (\text{II-16})$$

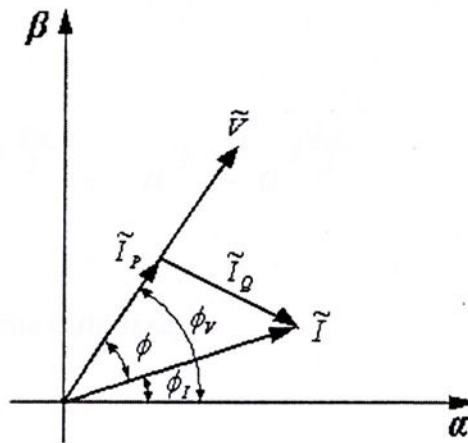


Figura II.3 - Decomposição do vetor espacial instantâneo $\tilde{I}$, na direção do vetor $\tilde{V}$ e em quadratura com este.

A potência real é a potência trocada entre elementos armazenadores de energia do circuito elétrico e as fontes externas que são relacionadas à variação de energia armazenada ou à potência que flui através do sistema [03-05].

A potência imaginária é definida, tomando-se a parte imaginária de $\tilde{S}$:

$$Q = \text{Imag}\{\tilde{S}\} \quad (\text{II-17})$$

A potência imaginária não apresenta ainda um significado físico bem determinado; mas pode-se constatar que vem a ser a amplitude instantânea da potência reativa instantânea calculada em qualquer fase do sistema trifásico e é uma quantidade proporcional à energia armazenada no circuito elétrico quando a velocidade angular do vetor espacial instantâneo corrente é constante [03].

Quando a energia armazenada é constante o sistema está em regime permanente e a potência imaginária torna-se a potência reativa convencional.

Pode-se obter a expressão da potência real em termos das componentes $\hat{a}$, como mostrado a seguir:

Substituindo-se nas equações (II-13) e (II-14) os operadores

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad e \quad a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$$

pelas suas expressões na forma cartesiana,

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad ; \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

tem-se:

$$\tilde{V} = \frac{2}{3} [v_a + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})v_b + (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})v_c] \quad (\text{II-18})$$

cuja componentes no eixo real e imaginário são respectivamente,

$$V_{\alpha} = \frac{2}{3}(v_a - \frac{1}{2}v_b - \frac{1}{2}v_c) \quad (\text{II-19})$$

e

$$V_{\beta} = \frac{2}{3}(\frac{\sqrt{3}}{2}v_b - \frac{\sqrt{3}}{2}v_c) \quad (\text{II-20})$$

Analogamente, tem-se para corrente,

$$\tilde{I} = \frac{2}{3}[i_a + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})i_b + (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})i_c] \quad (\text{II-21})$$

e

$$I_{\alpha} = \frac{2}{3}(i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c) \quad (\text{II-22})$$

$$I_{\beta} = \frac{2}{3}(\frac{\sqrt{3}}{2}i_b - \frac{\sqrt{3}}{2}i_c) \quad (\text{II-23})$$

Substituindo as equações de $\tilde{V}$ e $\tilde{I}$ do plano complexo α - β , na equação (II-15), e lembrando-se que

$$I^* = (I_{\alpha} - jI_{\beta}) \quad (\text{II-24})$$

Logo,

$$\tilde{S} = \frac{2}{3}(V_{\alpha} + jV_{\beta})(I_{\alpha} - jI_{\beta}) \quad (\text{II-25})$$

Portanto, a equação geral da potência complexa instantânea $\tilde{S}$ em termos de coordenadas α - β , pode ser escrita da seguinte forma:

$$\tilde{S} = \frac{2}{3}[(V_{\alpha}I_{\alpha} + V_{\beta}I_{\beta}) + j(V_{\beta}I_{\alpha} - V_{\alpha}I_{\beta})] \quad (\text{II-26})$$

Separando-se suas partes real e imaginária têm-se as equações (II-27) e (II-29) a seguir:

$$P = \frac{3}{2}(V_{\alpha}I_{\alpha} + V_{\beta}I_{\beta}) \quad (\text{II-27})$$

Desenvolvendo-se (II-27) em termos das variáveis instantâneas trifásicas tem-se a potência real da seguinte forma:

$$P = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (\text{II-28})$$

De forma semelhante, obtém-se para a potência imaginária a seguinte expressão:

$$Q = \frac{3}{2}(V_{\beta}I_{\alpha} - V_{\alpha}I_{\beta}) \quad (\text{II-29})$$

e em termos das variáveis trifásicas,

$$Q = \sqrt{3}(v_b i_a - v_a i_b) \quad (\text{II-30})$$

Define-se o fator de potência instantâneo como:

$$FPI = \cos \phi \quad (\text{II-31})$$

sendo ϕ , o ângulo de defasagem entre o vetor espacial instantâneo tensão, $\tilde{V}$ e o vetor espacial instantâneo corrente, $\tilde{I}$.

Observa-se que a potência real pode ser obtida pela equação representada por:

$$P = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}| \cos \phi \quad (\text{II-32})$$

De forma análoga à potência imaginária pode ser obtida por:

$$Q = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}| \sin \phi \quad (\text{II-33})$$

As potências reativas instantâneas, das fases α e β podem ser obtidas utilizando-se a expressão para a potência real devida à componente da corrente, I_Q , em quadratura com a tensão:

$$P_Q = \text{Real}\{\tilde{V} \tilde{I}_Q^*\} \quad (\text{II-34})$$

a qual pode ser decomposta da seguinte forma:

$$P_Q = P_{Q_\alpha} + P_{Q_\beta} = 0 \quad (\text{II-35})$$

A parcela da equação (II-35), P_{Q_α} pode ser também dada por

$$P_{Q_\alpha} = V_\alpha \sin(\phi_v) |\tilde{I}_Q| \quad (\text{II-36})$$

e a parcela P_{Q_β} por

$$P_{Q_\beta} = V_\beta \cos(\phi_l) |\tilde{I}_Q| \quad (\text{II-37})$$

As potências reativas, iguais e de sinais contrários, segundo Akagi [05], se referem à troca de energia entre os elementos armazenadores de energia, indutores e capacitores.

As potências ativas instantâneas são obtidas considerando-se a componente do vetor corrente, $\tilde{I}_p$, em fase com o vetor tensão, como descrita na equação

$$P_p = \text{Real}\{\tilde{V} \tilde{I}_p^*\} = P \quad (\text{II-38})$$

que se decompõe também em duas parcelas:

$$P_p = P_{p_\alpha} + P_{p_\beta}, \quad (\text{II-39})$$

sendo a parcela P_{p_α} dada por

$$P_{P\alpha} = V_{\beta} \operatorname{sen}(\phi_V) |\tilde{I}_P| \quad (\text{II-40})$$

e $P_{P\beta}$ dada por

$$P_{P\beta} = V_{\beta} \cos(\phi_I) |\tilde{I}_P| \quad (\text{II-41})$$

Estas expressões das componentes das potências instantâneas não serão utilizadas no nosso trabalho, pois, o enfoque dado é o estudo de transitórios em condições de cargas equilibradas. Foram aqui mostradas somente a título de revisão do assunto.

II.3. Um novo conceito de Potência Elétrica

A potência ativa recebida por elementos armazenadores de energia (capacitores e indutores) ideais é conceituada por Milanez em [06 e 07]; entendendo-se como tal a potência recebida de fontes de energia externas no sistema elétrico. Esta potência se faz presente durante transitórios e mesmo em regime permanente senoidal (RPS) em sistemas trifásicos desbalanceados ou em regime permanente não senoidal (RPNS).

Em seu trabalho de livre docência [08], Milanez demonstra que a energia instantânea armazenada nos indutores de uma carga indutiva trifásica pode ser calculada pela relação entre a potência imaginária e o dobro da velocidade angular do vetor espacial instantâneo representativo das correntes nestes indutores.

Considerando um caso simples, para o qual se tem apenas uma indutância L constante e uma resistência R também constante, Milanez contesta a teoria clássica dos circuitos elétricos de que “o único elemento que recebe potência ativa é a resistência”, afirmando que isto é verdadeiro em condições de regime permanente senoidal. Porém, durante transitórios e para regimes permanente não senoidais esta afirmação já não é válida. Sendo que a indutância, além da potência reativa, recebe também potência ativa. Adicionalmente, propõe o parcelamento da potência real total, na parcela que está sendo consumida por esta indutância e na outra parcela está sendo consumida pelo resistor,

$$P = P_R + P_L,$$

sendo

$$P_R = \frac{3}{2} R |\tilde{I}|^2 \quad (\text{II-42})$$

As perdas por efeito Joule dadas por (II-42), quando subtraídas da potência real total P , dada por:

$$P = \frac{3}{2} (V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta) \quad (\text{II-43})$$

possibilitam calcular o valor da indutância equivalente da seguinte forma:

$$L = \frac{2}{3} \frac{Q}{|\tilde{I}| \omega_{\phi_I}} \quad (\text{II-44})$$

Como não são conhecidos a priori os valores de R e L , calcula-se inicialmente L por (II-44) e depois R por (II-43) e (II-42).

Baseando-se neste método, e supondo que durante o transitório não se conhecem todos os parâmetros da máquina síncrona, determina-se, portanto, uma impedância equivalente para substituir o circuito equivalente desta.

Calcula-se, portanto, uma indutância equivalente L_{eq} variável e uma resistência elétrica R_{eq} variável. Variação esta devida à variação do ângulo de carga e as correspondentes variações das potências ativa e reativa. A Figura II.5 ilustra o circuito equivalente:

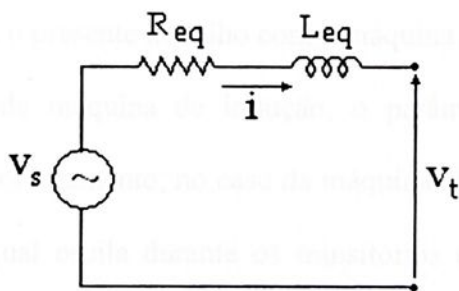


Figura II.5 – Circuito elétrico RL equivalente para um modelo simples da máquina síncrona.

Um dispositivo digital nos terminais de entrada da máquina, medindo apenas as variáveis tensão e corrente, pode calcular separadamente a potência ativa que está sendo dispersa por efeito Joule nas resistências dos enrolamentos, ou que está sendo transformada em trabalho no eixo, e a parcela que está sendo armazenada nas indutâncias, ou seja, no campo magnético girante.

III. Monitoração, Análise e Proteção de Linhas de Transmissão

A utilização de vetores espaciais instantâneos inicialmente para análise de transitórios de máquinas elétricas de corrente alternada e para o controle vetorial destas, pode se estendida, como sugere Milanez [08] a circuitos elétricos trifásicos em geral, com ou sem o condutor neutro. Porém, poucos exemplos de aplicação têm sido apresentados. Na dissertação de mestrado de De Moura [09] a teoria foi aplicada ao estudo de transitórios de partida da máquina de indução, quando se constatou que o vetor espacial corrente descreve o diagrama de círculo da máquina, e observou-se que este vetor gira com velocidade angular constante síncrona durante o transitório eletromecânico. Podendo, portanto, ser tratado em cada instante de tempo considerado, durante estes transitórios, como fasores convencionais. Estes resultados motivaram o presente trabalho com a máquina síncrona.

No caso da máquina de indução, o parâmetro variável no traçado do diagrama de círculo é o escorregamento; no caso da máquina síncrona o parâmetro variável é o ângulo de potência, o qual oscila durante os transitórios eletromecânicos. Confirma-se aqui, também, que devido à alta constante de tempo de variação deste parâmetro em relação às constantes de tempo das grandezas elétricas, o vetor espacial instantâneo corrente também gira com velocidade constante durante o transitório eletromecânico. Sendo assim, toda as teorias desenvolvidas para a análise de sistemas de potência baseadas em modelos em regime permanente senoidal podem ser utilizadas em tempo real na monitoração "on-line" destes sistemas, com possíveis aplicações a sistemas de proteção digital. São mostrados, portanto, neste trabalho, o método para o levantamento dos diagramas de círculo utilizando-se vetores espaciais instantâneos e o método para levantamento dos diagramas de impedância. Os diagramas de círculo obtidos são referidos ao terminal emissor da linha de transmissão.



III.1. Diagramas de Círculo em uma Linha de Transmissão.

Como elementos de monitoração e análise das condições de operação e desempenho de sistemas elétricos de potência são utilizados os conceitos de diagramas de círculo [10], traçados com base na variação da carga no terminal receptor da linha de transmissão. Estes diagramas constituem-se no lugar geométrico da potência complexa calculada neste ponto e podem ser traçados em relação ao barramento transmissor ou receptor.

No nosso estudo será adotado como referência o barramento transmissor, pois o modelo utilizado considerará a reatância equivalente obtida pela soma da reatância da linha de transmissão e a reatância síncrona da máquina.

A análise de diagramas de círculo fornece aos engenheiros de sistemas de potência informações tais como a tensão que deve ser mantida no terminal emissor da linha de transmissão para uma determinada carga e tensão no terminal receptor. Adicionalmente, possibilita a determinação da quantidade de potência reativa que deve ser fornecida pela máquina síncrona de forma a melhorar o fator de potência e reduzir a regulação de tensão para manter constante a tensão no terminal receptor, em função da variação da carga para uma dada tensão no terminal transmissor [10].

A seguir apresenta-se um breve resumo desta teoria e o método convencional utilizado para o traçado dos diagramas:

Em estudos de sistemas de potência é usual representar uma linha de transmissão trifásica através de um quadripólo no qual dois terminais correspondem à potência de entrada que representa a barra geradora e dois terminais de potência de saída que representam a barra receptora, indicados na Figura III.1 sendo o quadripólo caracterizado pelas constantes A, B, C e D, chamadas de constantes de linha.



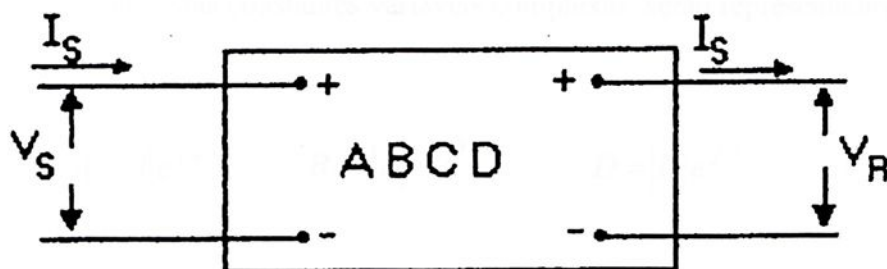


Figura III.1 - Diagrama equivalente de uma Linha de Transmissão trifásica com dois pares de terminais (quadripólo)

Sendo que a constante **A** é a relação entre as tensões nas barras geradora e receptora e representa uma grandeza adimensional devido à relação entre as duas tensões.

A constante **B** representa a relação entre a tensão na barra geradora e a corrente na barra receptora, para estas condições **B** terá dimensões de uma impedância e será medida em ohms.

A constante **C** é a relação entre a corrente na barra geradora e a tensão na barra receptora e terá dimensões uma admitância, medida em mhos.

A constante **D** é a relação entre as correntes nas barras geradora e receptora e representa uma grandeza adimensional devido à relação entre duas correntes.

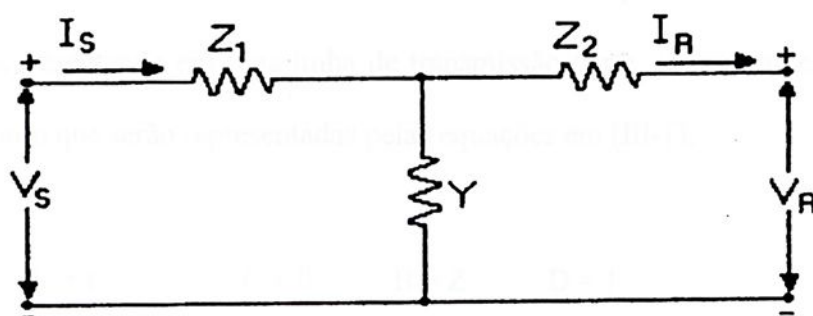


Figura III.2 - Circuito *T* assimétrico equivalente para uma Linha de Transmissão, com dois pares de terminais

Sendo estas constantes variáveis complexas, serão representadas por:

$$A = |A|e^{j\alpha} \quad B = |B|e^{j\beta} \quad D = |D|e^{j\Delta}$$

A constante C não é utilizada na construção do diagrama como será visto a seguir.

Como estes circuitos possuem dois terminais em comum, poderão, ser tratados como circuitos de três terminais e, já que foi escolhido neste estudo o modelo T assimétrico equivalente, o circuito fica assim representado, como mostrado na Figura III.2.

III. 2. Construção de Diagramas de Círculo para o Barramento Transmissor

Traça-se o círculo representativo da linha de transmissão calculando-se as coordenadas do seu centro $n(P, Q)$ e o seu raio R .

Neste estudo, considerou-se um circuito série, onde a admitância paralela é igual a zero, representando em uma linha de transmissão curta, as constantes generalizadas ABCD do circuito que serão representadas pelas equações em (III-1).

$$A = 1 \quad C = 0 \quad B = Z \quad D = 1 \quad (\text{III-1})$$

sendo a impedância da linha, $Z = X_L$, as coordenadas do ponto n e o raio são dadas por:

$$P(\text{horizontal}) = + \frac{|D|}{|B|} \cdot |\dot{V}_S|^2 \cos(\beta - \Delta) \quad [MW] \quad (\text{III-2})$$

$$Q(\text{vertical}) = + \frac{|D|}{|B|} \cdot |\dot{V}_S|^2 \sin(\beta - \Delta) \quad [MV\text{Ars}] \quad (\text{III-3})$$

$$R = \frac{|\dot{V}_S| \cdot |\dot{V}_R|}{|B|} \quad [MVA] \quad (\text{III-4})$$

O fasor $D\dot{V}_S$ está defasado de um ângulo Δ em relação ao fasor $\dot{V}_S$ de referência, como indica a Figura III.3. Neste diagrama fasorial, $\dot{V}_S$ é o fasor de referência para os demais fasores do diagrama.

O ângulo δ é o ângulo de carga, sendo a defasagem entre as tensões no barramento transmissor e receptor.

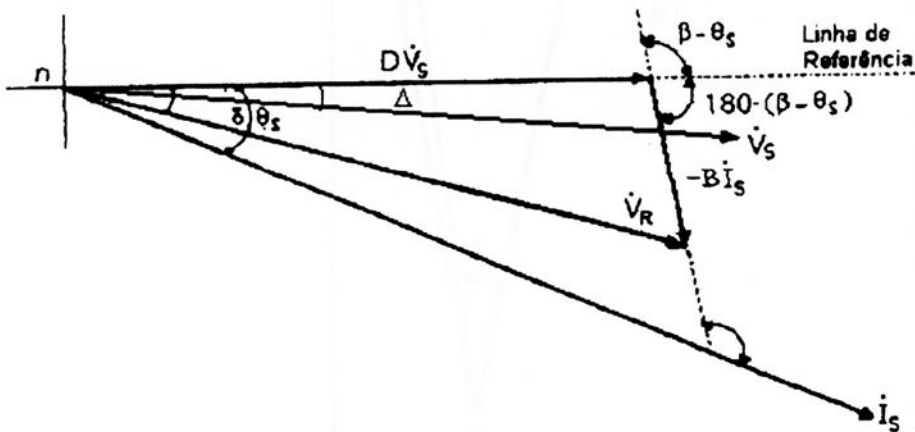


Figura III.3 - Diagrama fasorial para um quadripólo que recebe uma corrente $\dot{I}_S$ no barramento transmissor.

O ângulo de potência δ , é de grande importância no estudo da estabilidade dos sistemas de potência que é medido a partir de $\frac{|\dot{V}_S|^2}{|B|}$ até o ponto k sobre a reta que intercepta a curva do transitório eletromecânico.

A posição k representa a carga máxima que pode ser transmitida para as tensões definidas nos barramentos transmissor e receptor. Fazendo-se a rotação do diagrama de círculo do barramento transmissor da Figura III.3, obtém-se o diagrama mais usual apresentado na Figura III.4.

Mantendo-se constantes $|\dot{V}_S|$ e $|\dot{V}_R|$, com a variação da potência fornecida ao circuito, a posição do ponto n permanecerá fixa, ou seja, o raio do círculo permanecerá também constante. A posição do ponto k sofrerá deslocamento com a variação do ângulo de potência δ .

III.3. Relés de distância

Neste capítulo apresentam-se de forma resumida os fundamentos dos denominados “relés de distância” [11-13].

Denomina-se relé de distância àquele dispositivo que, de alguma forma, compara as grandezas tensão e corrente no seu ponto de aplicação.

Quando em um sistema, composto de um grupo de máquinas síncronas, pelo menos uma delas sai do sincronismo em relação às demais máquinas, esta deve ser desligada. Esta manobra pode causar perturbações em todo o sistema. Para tal desligamento,

deverão ser respeitadas as condições de fornecimento de energia, sem prejuízo para o sistema. Curtos-circuitos também requerem a operação imediata dos relés e conseqüentemente dos disjuntores de proteção. Existem, entretanto, situações como a de oscilações de máquinas síncronas dentro do limite de estabilidade que não devem provocar o desligamento destas. Trata-se de processos que devem ser levados a feito de forma cautelosa.

Deve-se, portanto, considerar a importância dos relés, os quais são requeridos para distinguir entre condições normais, curto circuitos, oscilações em grandes amplitudes e saídas das condições de sincronismo, os quais poderão ser solicitados para qualquer uma destas situações.

A Figura III.5 mostra o circuito equivalente de duas máquinas síncronas em operação, para um sistema de duas máquinas (sistema de máquinas simples).

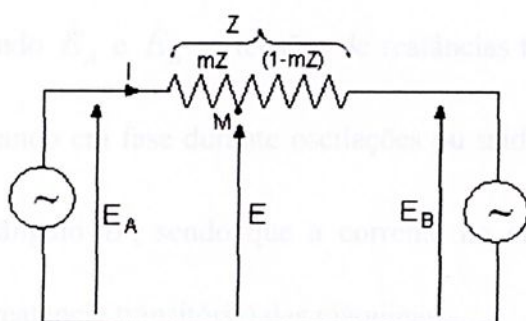


Figura III.5 - Circuito equivalente de duas máquinas para demonstração do efeito da oscilação ou saída de sincronismo no relé de operação.

A impedância da linha de transmissão vista pelo relé de impedância varia com as oscilações destas máquinas descrevendo lugares geométricos na forma de círculos.

As oscilações ou saída de sincronismo para grupos de máquinas síncronas em um determinado instante em cada ciclo há um escorregamento cuja defasagem é 180° . Nestas condições o sistema responde como se fosse um curto-circuito franco trifásico, e as

correntes de linha muito altas. Desta forma, os relés de proteção de linha farão com que os disjuntores se abram, o que é uma operação indesejada.

Com o objetivo de levantar-se o diagrama de impedância será considerado o diagrama de fasores mostrado na Figura III.6:

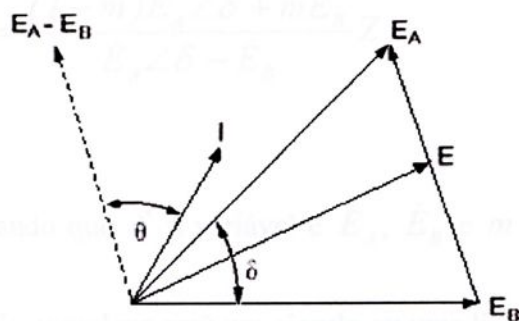


Figura III.6 - Diagrama vetorial para o circuito do sistema de duas máquinas.

Admitindo $\dot{E}_A$ e $\dot{E}_B$ as tensões de reatâncias transitórias e constantes em magnitude, embora, variando em fase durante oscilações ou saída de sincronismo, com $\dot{E}_A$ adiantada de $\dot{E}_B$ pelo ângulo δ , sendo que a corrente no circuito série é sendo Z a impedância do circuito (reatância transitória) das máquinas.

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_A \angle \delta - \dot{E}_B}{Z} \quad (\text{III-5})$$

Considerando que a impedância Z para qualquer parte do circuito tem o mesmo ângulo de defasagem e dividindo a impedância total Z do circuito pelo relé de posição Z em duas partes, que seriam mZ e $(1-m)Z$ como mostra a Figura III.5.

Sendo $m \leq 1$ comparando as tensões no ponto Z , têm-se $\dot{E}$ em função de $\dot{E}_B$, como

$$\dot{E} = (1-m)\dot{E}_A \angle \delta + m\dot{E}_B \quad (\text{III-6})$$

Então os relés de distância no ponto M irão perceber uma impedância Z_r , assim escrita

$$Z_r = \frac{\dot{E}}{\dot{I}} = \frac{(1-m)\dot{E}_A \angle \delta + m\dot{E}_B}{\dot{E}_A \angle \delta - \dot{E}_B} Z \quad (\text{III-7})$$

Considerando que δ é variável e $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$ e m são constantes, a posição

Z_r no plano da impedância complexa será um círculo ou uma linha reta.

Considerando a figura III.7 e admitindo $\dot{E}_A = \dot{E}_B$ para simplificar onde Z

será uma reta.

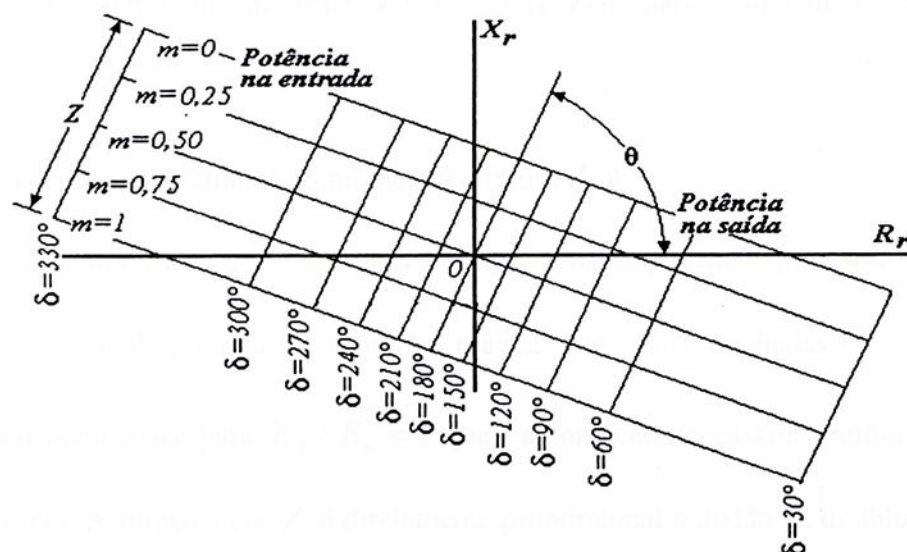


Figura III.7 - Lugar Geométrico da Impedância r vista pelo Relé durante oscilações ou saída de sincronismo no sistema de duas máquinas.

Dividindo a equação (III-7) por Z e dividindo o numerador e denominador por $\dot{E}_A = \dot{E}_B$, obtêm-se a equação (III-8).

$$\frac{Z_r}{Z} = \left(\frac{1}{2} - m\right) - j \frac{1}{2} \cot g \frac{\delta}{2} \quad (\text{III-8})$$

sendo que a reta vertical, com a parte real constante e a impedância variando em função de δ .

Multiplicando ambos os membros da equação por Z a reta é girada de um ângulo de impedância θ . Na Figura III.7 com m variando ($0 \leq m \leq 1$) em intervalos de $m = 0,25$ para um δ variando em 30° no intervalo $0 \leq \delta \leq 330^\circ$.

Verificam-se as seguintes condições:

- se $\dot{E}_A$ e $\dot{E}_B$ estão em fase, a corrente é Zero e Z é infinita.
- se $\dot{E}_A$ e $\dot{E}_B$ estão defasadas de 180° , a tensão será Zero para a metade da linha ($m = 1/2$).
- se $\dot{E}_A \neq \dot{E}_B$ as curvas são circulares como mostra a figura IV.4.

Na Figura III.8 com a oscilação da curva da impedância para todos os valores de $\dot{E}_A / \dot{E}_B$ o qual poderia ser usado na prática são mais fechadas do que a linhareta que é lugar geométrico para $\dot{E}_A / \dot{E}_B = 1$ que é a condição necessária e suficiente para ser uma linha reta. A impedância Z é diretamente proporcional à distância de falta do relé.

O desenvolvimento teórico apresentado neste capítulo mostra as relações fasoriais de tensão e corrente e os gráficos correspondentes. Sendo, portanto, em tratando-se

de fasores, cada ponto plotado, corresponde ao estado do sistema considerado em equilíbrio e em regime permanente senoidal.

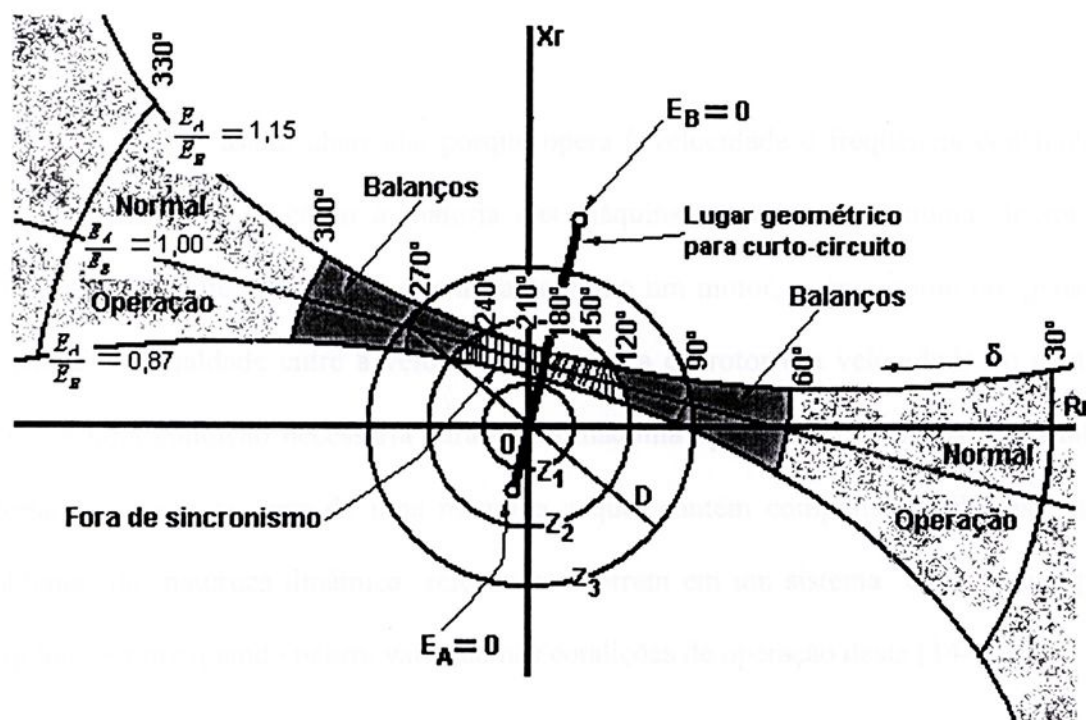


Figura III.8 - Impedância vista pelo Relé durante condição normal de carga, oscilação, saída de sincronismo, Curto-circuito e características de disparo do Relé de Impedância.

No capítulo V mostra-se que vetores espaciais instantâneos comportam-se como fasores durante o transitório eletromecânico, após a ocorrência do transitório eletromagnético. Possibilitando, portanto, o levantamento “on-line” e em tempo real dos referidos diagramas e, conseqüentemente, a análise e monitoração do comportamento do sistema elétrico.

IV. Modelagem, Simulação e Análise de Transitórios da Máquina Síncrona

IV.1. A Máquina Síncrona

É assim chamada, porque opera à velocidade e frequência constantes em regime permanente. E, como a maioria das máquinas girantes, a máquina síncrona não poderia ser diferente, é capaz de operar tanto como um motor, quanto como um gerador. A exigência da igualdade entre a velocidade mecânica do rotor e a velocidade do campo do estator é uma condição necessária para que a máquina opere em condições satisfatórias; entretanto, como se trata de uma máquina a qual contém componentes físicos móveis, problemas de natureza dinâmica relevantes ocorrem em um sistema com este tipo de máquina, sempre quando ocorre variação nas condições de operação desta [14-17].

Este processo transitório durante o qual a máquina sai de uma condição de carga (ou outras condições de operação) se desenvolve com a oscilação do rotor, do ângulo de carga e das demais variáveis eletromecânicas.

Por exemplo, no caso de um motor síncrono submetido subitamente a um aumento de carga no seu eixo, este diminuirá sua velocidade, e rapidamente precisará aumentar o ângulo de carga para suprir essa solicitação mecânica. Esse processo se dá com certa quantidade de oscilações até que o ângulo de equilíbrio seja atingido e a relação entre a velocidade mecânica do rotor e a velocidade do campo do estator atinja a igualdade; ou seja, a velocidade síncrona.

Estas oscilações serão analisadas neste trabalho, através da simulação de um modelo simples da máquina síncrona, com a interpretação dos efeitos sobre as variáveis

eletromecânicas e principalmente aquelas relacionadas com o traçado dos diagramas de círculo e de impedância.

IV.1.1. Transitório Eletromecânico na Máquina Síncrona

Nos sistemas de potência, um dos problemas que se encontra em relação à máquina síncrona operando como motor, devido ao fato do conjugado ser função do deslocamento angular do rotor, é que o rotor é acionado pelo fluxo girante do estator que exerce uma força de arrasto sobre o mesmo, acarretando que essa força, mais a inércia das partes móveis da máquina, provocam certas oscilações, motivando a necessidade de um amortecimento adequado para exercer a estabilidade do eixo da máquina. Portanto, há necessidade de se adicionar o chamado enrolamento amortecedor. O efeito provocado por este enrolamento, entretanto, não é sentido na rotação síncrona da máquina, quando em sincronismo.

O sistema possui, em geral, a inércia necessária suficientemente grande a ponto de tornar o transitório mecânico muito mais lento do que o elétrico. Ou seja, as constantes de tempo elétricas são muito pequenas em relação à constante de tempo mecânico.

Nos sistemas elétricos de geração e transmissão de energia, deve-se considerar, também, com muita atenção, os transitórios elétricos [18]. Como os geradores que geram a energia operam em sincronismo, os ajustes e a obediência de coordenação das



aberturas dos disjuntores para as possíveis ocorrências de falha, têm função altamente importante na estabilidade do sistema de potência.

Das falhas, se devem considerar como mais importantes os curtos-circuitos e as sobrecargas bruscas, pois são as que causam as maiores perturbações nas estabilidades elétrica e mecânica da máquina.

Vale também lembrar que todo transitório no sistema elétrico de potência é caracterizado pela taxa de variação da energia total armazenada no sistema eletromagnético. Esta energia pode ser calculada, bem como a sua taxa de variação, utilizando-se o método descrito na seção II.3, o que é feito neste trabalho. Esta grandeza poderá ser utilizada em futuras análises, juntamente com estudo de padrões de variação de outras grandezas que possam auxiliar na distinção de tipos de eventos que ocorrem normalmente em sistemas de potência.

No regime permanente a máquina síncrona funciona como gerador ou como motor e se apresenta com estado de conjugados, potências, velocidades, tensões e correntes constantes, portanto nosso objeto de estudo consiste no exame do que poderia ocorrer quando uma ou algumas dessas grandezas sofrer variação, o que ocorreria em nosso sistema variação da energia total e, tais fatos caracterizam os transitórios.

O efeito do enrolamento amortecedor será considerado apenas na oscilação mecânica da máquina.

A equação (IV-1), mostrada a seguir, é denominada equação “swing” da máquina e descreve o seu comportamento mecânico.

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{T_L - T_E}{J} \quad (\text{IV-1})$$

sendo:

T_E = torque eletromagnético no eixo da máquina

T_L = torque de carga no eixo da máquina

J = momento de inércia da máquina

A seguir apresenta-se o desenvolvimento das equações de potência e torque eletromagnético, utilizando-se os diagramas fasoriais convencionais de tensão e corrente da máquina:

Considerando a máquina trifásica de pólos lisos operando na condição de gerador, Figura IV.1, a qual pode operar a um fator de potência grande com uma corrente $\vec{I}$, força eletromotriz $\vec{E}$ e tensão nos terminais $\vec{V}$.

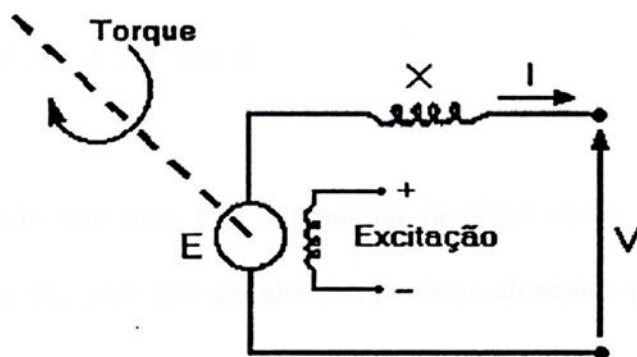


Figura IV.1 - Circuito equivalente da máquina síncrona.

Na condição inicial de operação mostrada nos diagramas fasoriais da Figura IV.2, sob as condições de operação especificada, a potência de saída por fase pode ser expressa em termos das condições dos terminais do gerador.

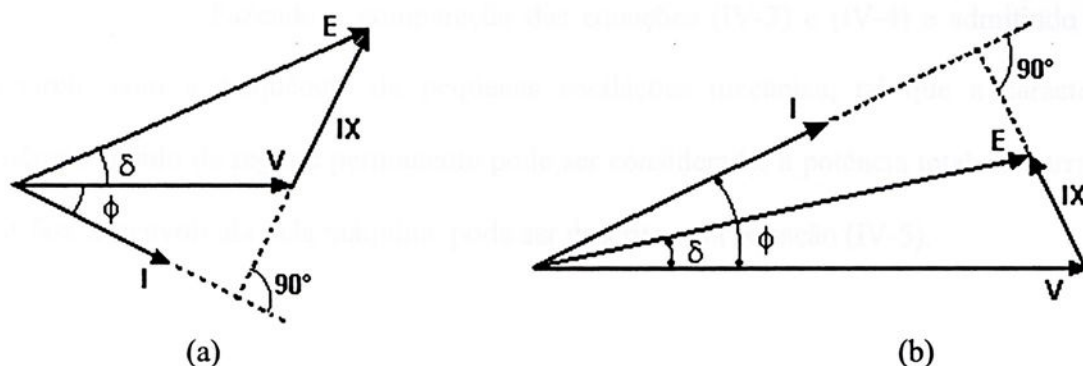


Figura IV.2 - Diagrama fasorial da condição de operação da máquina: (a) fator de potência adiantado (b) fator de potência atrasado

Analizando a característica potência-ângulo de carga dessa máquina figura V.2 e admitindo que ϕ é o ângulo de fator de potência e δ , o ângulo pelo qual $\vec{E}$ está atrasado de $\vec{V}$, é definido como ângulo de potência ou ângulo de carga, obtêm-se a equação (IV-2).

$$I X \cos \phi = V \sin \delta \quad (\text{IV-2})$$

Sendo que para $\delta > 0$ a máquina funciona como gerador e a potência desenvolvida por fase P_E , para esse gerador é a potência absorvida pela carga e dada pela equação (IV-3).

$$P_E = VI \cos \phi \quad (\text{IV-3})$$

Por outro lado, para $\delta < 0$, a máquina funciona como motor e a potência desenvolvida por fase P_E , passam a ser expressa pela equação (IV-4).

$$P_E = -VI \cos \phi \quad (\text{IV-4})$$

Fazendo a comparação das equações (IV-3) e (IV-4) e admitindo algum distúrbio com a frequência de pequenas oscilações mecânica, tal que a característica potência-ângulo de regime permanente pode ser considerada, a potência total do barramento por fase desenvolvida pela máquina pode ser descrita pela equação (IV-5).

$$P_E = \frac{EV}{X} \text{sen } \delta \quad (\text{IV-5})$$

Levando em conta a equação (IV-5) verifica-se a relação de proporcionalidade entre a potência desenvolvida pelo gerador e o $\text{sen } \delta$, visto na figura IV.3.

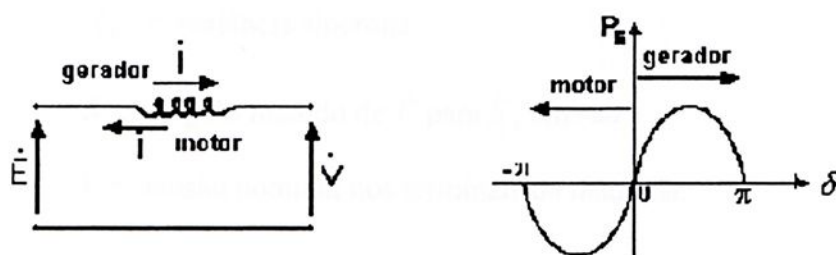


Figura IV.3 - Característica Potência-ângulo da Máquina Síncrona.

Logo, considerando equação (IV-5), para as três fases têm-se a equação (IV-6).

$$P_E = 3 \frac{EV}{X} \text{sen } \delta \quad (\text{IV-6})$$

Isto permite dizer que, para certo valor de tensão $\dot{V}$ de barramento, e certa corrente campo I_F correspondente a uma f.e.m de excitação $\dot{E}$, e, desprezando a resistência

de armadura da máquina, o conjugado gerado varia juntamente com o $\sin \delta$.

Lembrando que $P_M = T_L \omega_s$ e substituindo na equação (IV-6) tem-se o torque eletromagnético para as três fases da máquina expressa pela equação (IV-7).

$$T_E = 3 \frac{EV}{\omega_s X} \sin \delta \quad (\text{IV-7})$$

sendo: $X_L = \omega_s L$

E = f.e.m. desenvolvida na máquina

ω_s = velocidade angular síncrona

X_s = reatância síncrona

δ = ângulo medido de $\vec{V}$ para $\vec{E}$, em rad

V = tensão nominal nos terminais da máquina.

IV.2. Modelagem e Simulação da Máquina Síncrona

Nesta seção apresentam-se as equações utilizadas nas simulações com os respectivos diagramas de blocos.

O modelo foi implementado no Simulink.



No caso estudado modela-se uma máquina síncrona trifásica, com enrolamentos amortecedores e de pólos lisos, o que em termos práticos, poderia se dizer, um turbo gerador.

Trata-se de um modelo simples, onde modelam as características mecânicas e elétricas. O sistema elétrico equivalente de cada fase da máquina consiste de uma fonte de tensão, que representa a f.e.m. induzida pelo campo magnético do rotor, em série com uma indutância. A resistência série foi adotada com valor nulo.

Desta forma, para esta máquina empregou-se os parâmetros básicos como mostra o capítulo VI.1.1. que serão utilizados para os cálculos dos demais parâmetros da máquina.

IV.2.1. Parâmetros da Máquina Síncrona e Condições Iniciais de Operação:

A equação “swing” da máquina também pode ser apresentada da seguinte forma:

$$P_E - P_M = \frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{D \omega_M}{S_{3\phi}} \quad (\text{IV-8})$$

onde,

G potência nominal da máquina

GH energia cinética no eixo da máquina



Hconstante de inércia da máquina

sendo que

$$GH = \frac{1}{2} J \omega_s^2 \quad (\text{IV-9})$$

Os seguintes valores de parâmetros e condições de operação foram obtidos para o caso estudado:

$$G = 58 \text{ MVA}$$

$$\omega_s = 377 \text{ rad / s}$$

$$V_s = 13,8 \text{ KV}$$

$$H = 4,0 \text{ MJ / MVA}$$

$$GH = \frac{1}{2} J \omega_s^2 = 232 \text{ MJ}$$

$$J = 3,26 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

$$P_M = T_L \omega_s \quad \Rightarrow \quad T_L = \frac{P_M}{\omega_s}$$

$$T_L = \frac{58 \times 10^6}{377} = 153.846,15 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$L = 0,02 \text{ H} \Rightarrow XL = \omega_s L = 2\pi fL = 2 \times 3,15 \times 60 \times 0,02$$

$$XL = 7,54 \Omega$$

Na simulação, passa-se a considerar o sistema abaixo, formado pelas expressões, a seguir:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_E - T_L}{J} \quad (\text{IV-10})$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (\text{IV-11})$$

Considerando-se os enrolamentos amortecedores a equação “swing” toma a seguinte forma:

$$-T_E + T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m \quad (\text{VI-12})$$

sendo:

D = coeficiente de amortecimento, incluído o amortecimento elétrico;

ω_M = velocidade angular do rotor.

De onde se verifica que:

$$\omega_M = \frac{d\delta}{dt} + \omega_s \quad (\text{IV-13})$$

Logo se tem para a equação mecânica:

$$-T_E + T_L - D\omega_M = J \frac{d\omega_M}{dt} \quad (\text{IV-14})$$

cujo diagrama de blocos representativo mostra-se na Figura IV.4.

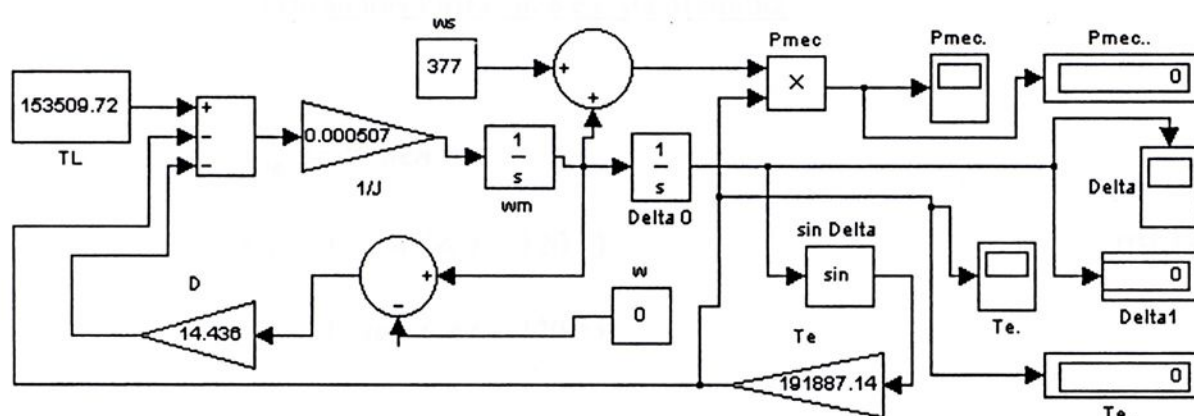


Figura IV.4 - Diagrama de blocos do sistema mecânico da máquina.

IV.2.2. Equacionamento do Sistema Elétrico para desenvolvimento das simulações

Nesta seção mostra-se o sistema elétrico formado por um modelo simples constituído da fonte de alimentação ideal, uma linha de curta distância representada por uma impedância série e a máquina síncrona representada pela sua fonte de *f.e.m.* e a reatância síncrona, como mostra a figura IV.5.

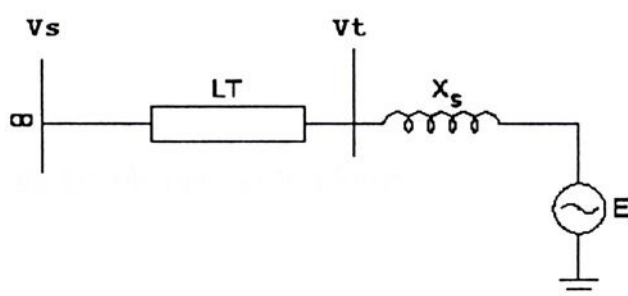


Figura IV.5 – Circuito representativo de uma linha de transmissão curta e da máquina síncrona.

Tensão nas Fases a, b e c da Máquina

$$\begin{aligned}v_{sa} &= V \operatorname{sen} \omega t \\v_{sb} &= V \operatorname{sen} (\omega t - 120^\circ) \\v_{sc} &= V \operatorname{sen} (\omega t + 120^\circ)\end{aligned}\tag{IV-15}$$

Força Eletromotriz nas Fases a, b e c da Máquina

$$\begin{aligned}e_a &= E \operatorname{sen} (\omega t - \delta) \\e_b &= E \operatorname{sen} (\omega t - 120^\circ - \delta) \\e_c &= E \operatorname{sen} (\omega t + 120^\circ - \delta)\end{aligned}\tag{IV-16}$$

Considerando:

$$R = 1\Omega \Rightarrow \text{resistência da linha}$$

$$L = 2mH \Rightarrow \text{indutância da linha}$$

$$L_s = 20mH \Rightarrow \text{indutância síncrona da máquina.}$$

IV.2.3. Equações de Tensão para as três Fases

Circuito Elétrico – fase a



Considera-se o circuito equivalente da máquina síncrona, fase a

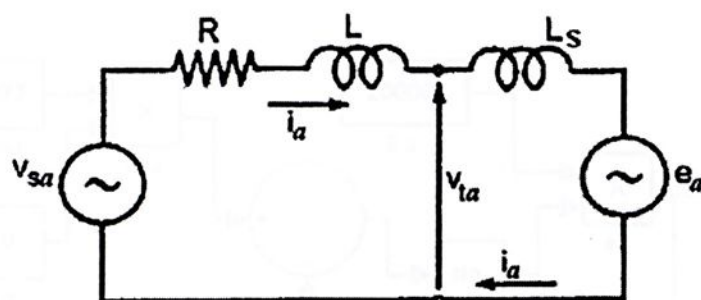


Figura IV.6 - Circuito elétrico equivalente fase a para este modelo de máquina.

e analisando o circuito da fase a e extraindo dele as equações correspondentes, obtêm-se:

$$v_{ta} = e_a + L_s \frac{di_a}{dt} \quad (\text{IV-17})$$

$$v_{sa} = L \frac{di_a}{dt} + v_{ta} + Ri_a \quad (\text{IV-18})$$

Portanto,

$$v_{sa} = (L + L_s) \frac{di_a}{dt} + e_a + Ri_a, \quad (\text{VI-19})$$

sendo

$$e_a = E_{\max} \text{sen}(\omega t - \delta)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{v_{sa} - e_a - Ri_a}{L + L_s} \quad (\text{IV-20})$$

e

$$v_{sa} = \hat{V}_s \text{sen } \omega t,$$

cujo diagrama de blocos em apresentado na figura IV.7.

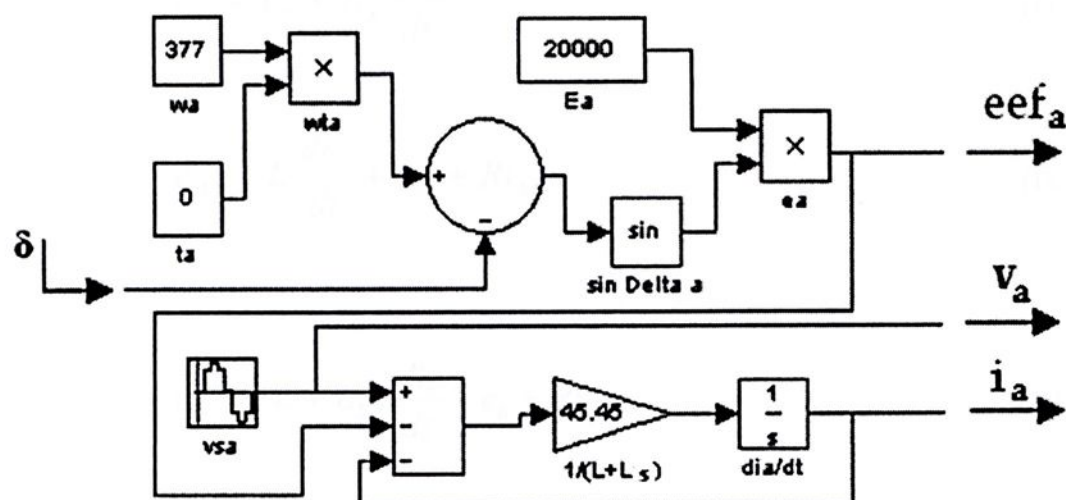


Figura IV.7- Diagrama de blocos do sistema elétrico – fase *a*

Circuito Elétrico – fase *b*

Considera-se o circuito equivalente da máquina síncrona fase *b*

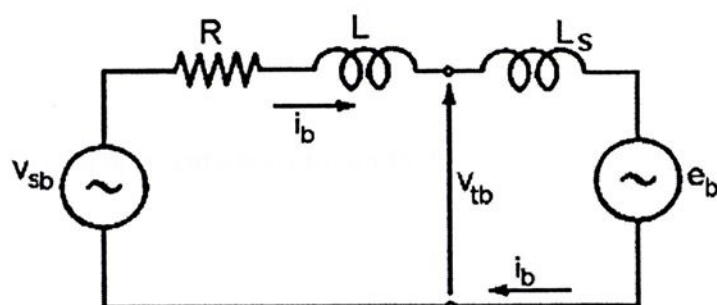


Figura IV.8 - Circuito elétrico equivalente fase *b* para este modelo de máquina.

E analisando o circuito da fase b e extraindo dele as equações correspondentes, obtêm-se:

$$v_{tb} = e_b + L_S \frac{di_b}{dt} \quad (\text{IV-21})$$

$$v_{sb} = L \frac{di_b}{dt} + v_{tb} + Ri_b \quad (\text{IV-22})$$

Logo,

$$v_{sb} = (L + L_S) \frac{di_b}{dt} + e_b + Ri_b, \quad (\text{IV-23})$$

e

$$\frac{di_b}{dt} = -e_b + \frac{v_{sb}}{L + L_S} + Ri_b \quad (\text{IV-24})$$

sendo

$$e_b = E_{\max} \text{ sen } (\omega t - 120^\circ - \delta)$$

tem-se

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{v_{sb} - e_b - Ri_b}{L + L_S} \quad (\text{IV-25})$$

$$v_{sb} = \hat{V}_S \text{ sen } \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{IV-26})$$

cujo diagrama de blocos em apresentado na figura IV.9..

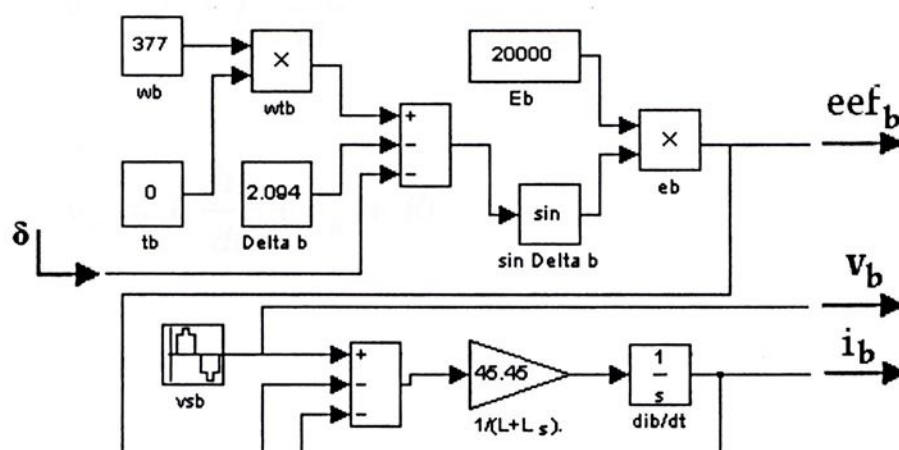


Figura IV.9 - Diagrama de bloco do sistema elétrico – fase *b*

Circuito Elétrico – fase *c*

Considera-se o circuito equivalente da máquina síncrona, fase *c*,

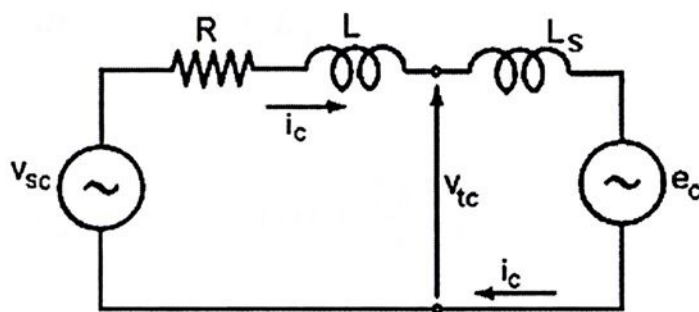


Figura IV.10: Circuito elétrico equivalente fase *c* para este modelo de máquina.

e analisando o circuito da fase *c* e extraindo dele as equações correspondentes, obtém-se:

$$v_{tc} = e_c + L_s \frac{di_c}{dt} \quad (\text{IV-27})$$

$$v_{sc} = L \frac{di_c}{dt} + v_{tc} + Ri_c \quad (\text{IV-28})$$

de onde:

$$v_{sc} = (L + L_s) \frac{di_c}{dt} + e_c + Ri_c$$

logo,

$$\frac{di_c}{dt} = -e_c + \frac{v_{sc}}{L + L_s} + Ri_c, \quad (\text{IV-29})$$

sendo

$$e_c = E_{\max} \operatorname{sen} (\omega t + 120^\circ - \delta)$$

tem-se

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{v_{sc} - e_c - Ri_c}{L + L_s} \quad (\text{IV-30})$$

com

$$v_{sc} = \hat{V}_s \operatorname{sen} \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right),$$

cujo diagrama de blocos em apresentado na figura IV.11.

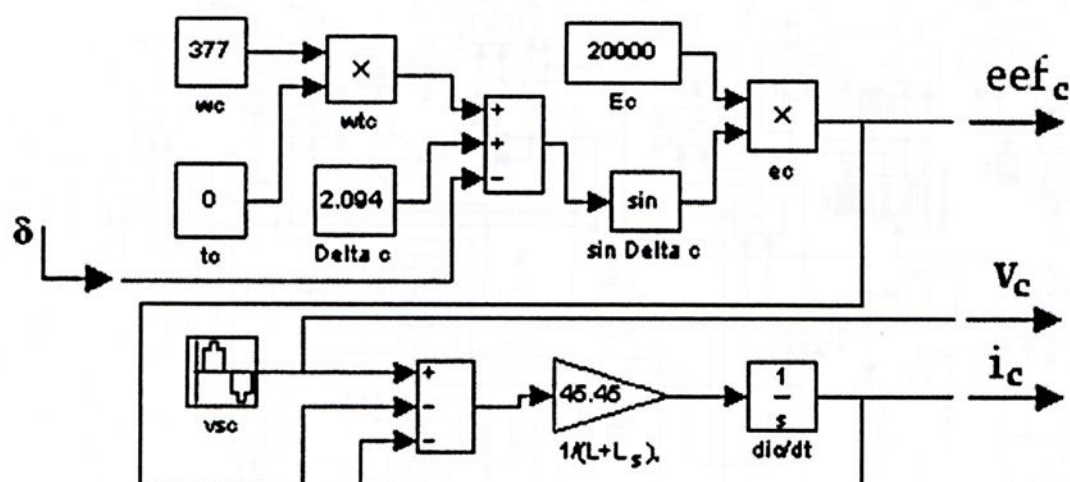
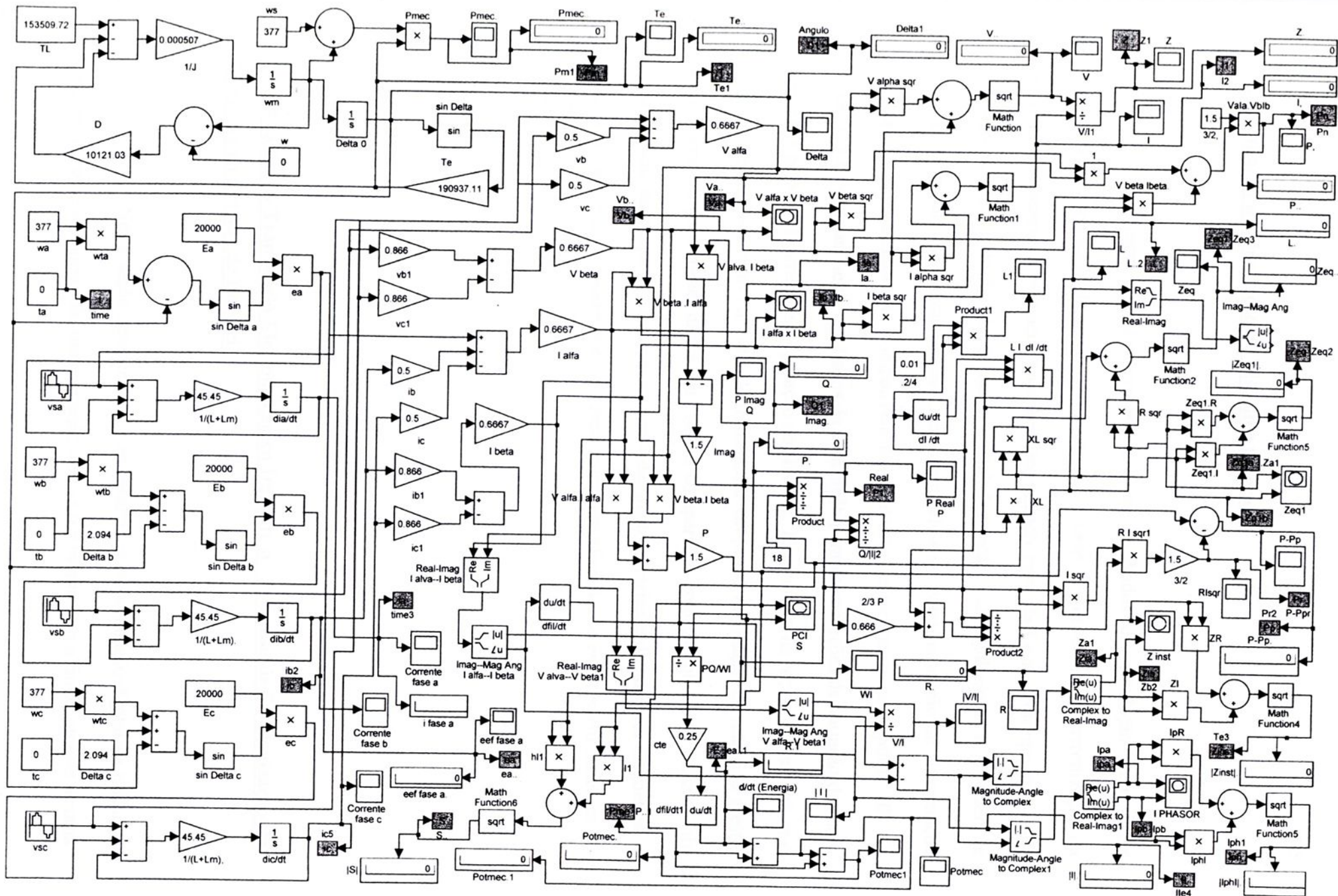


Figura IV.11 - Diagrama de blocos o sistema elétrico – fase c.

IV.2.4. Diagrama de blocos completo

A figura a seguir mostra os diagramas de blocos apresentados nas seções anteriores, porém interligados entre si, e os diagramas de blocos que indicam as operações matemáticas utilizadas no cálculo das grandezas complexas para tensões, correntes e potências; e as grandezas mecânicas. Todas apresentadas nas formas gráficas com as respectivas interpretações no capítulo a seguir.



V. Resultados da Simulação da Máquina Síncrona

Neste capítulo apresentam-se os resultados da simulação para várias condições de operação. Na seção V.1 estuda-se o caso do processo de sincronização da máquina ao sistema de potência, para um determinado valor da f.e.m, do torque mecânico aplicado ao eixo, e do ângulo de carga inicial. Na seção V.2 estuda-se o processo de sincronização para vários valores da f.e.m, mantendo-se o valor da tensão de alimentação constante. Os resultados são compatíveis aos previstos teoricamente no capítulo III. Na seção V.3 apresentam-se os resultados da simulação para as condições de variação da carga mecânica para a máquina já em operação no sistema. Finalmente, na seção V.4, mostra-se o caso de um curto-circuito na linha de transmissão no ponto de ligação da máquina a esta, com o objetivo de fornecer dados para serem comparados com os obtidos no processo de sincronização da máquina. Observa-se, particularmente, a variação da potência magnética, a qual pode servir como parâmetro adicional para identificação de eventos em sistemas de potência.

V.1. Análise do Transitório Eletromecânico Durante o Processo de Sincronização da Máquina ao Sistema de Potência

Nesta seção apresentam-se os resultados da simulação digital da máquina síncrona durante o processo de sincronização desta a um barramento infinito, através de uma



linha curta, com o campo energizado e com um ângulo de carga inicial δ_0 diferente de zero. A máquina, operando como motor, encontra-se previamente com carga, caso característico de retomada de sincronismo após um evento anterior qualquer em que ela sai do sincronismo.

Os resultados gráficos apresentados representam curvas características das grandezas físicas do processo transitório de uma máquina síncrona de pólos lisos para o modelo adotado. Para a simulação deste processo utilizam-se as condições iniciais da tabela V-1. Os valores dos parâmetros e das demais variáveis de saída da simulação, no final do processo transitório, encontram-se na tabela V-2.

GRANDEZA	MÓDULO	GRANDEZA	MÓDULO
δ_0	1,25 rad	f	60 Hz
T_L	153.509,72 N.m	V	14,14 KV
J	1.972,38 Kg.m ²	L_m	22 mH
D	10.121,30		

Tabela V-1 - Parâmetros e condições de operação da máquina.

A figura V.1 mostra a tensão no barramento infinito.

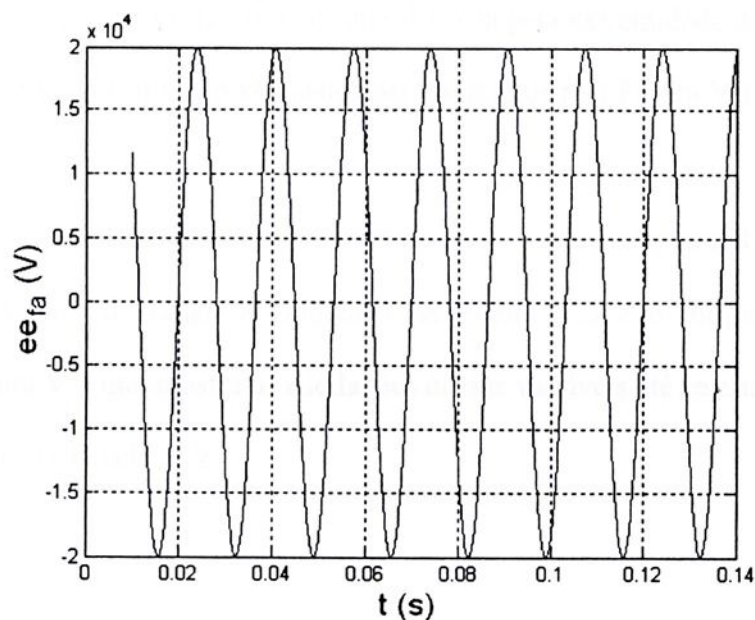


Figura V.1 – Tensão na fase a em função do tempo, no barramento infinito.

A figura V.2 mostra a trajetória do vetor espacial instantâneo tensão na barra infinita.

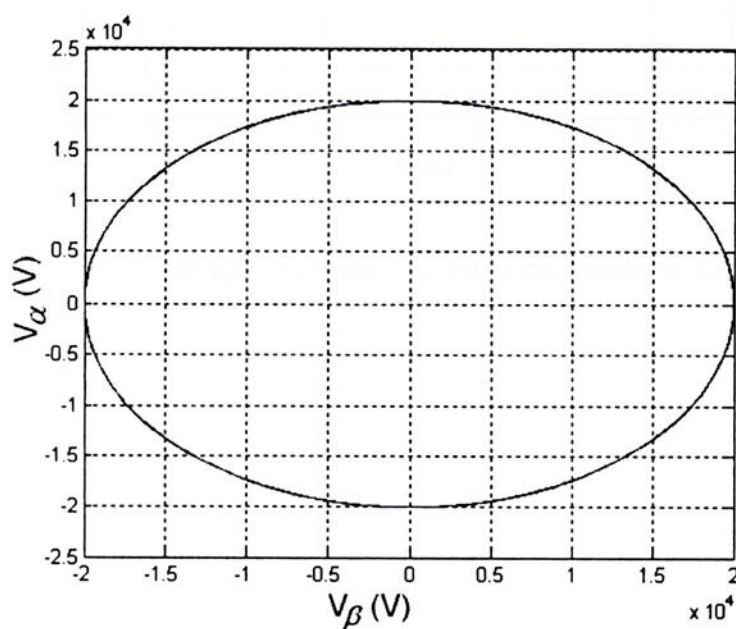


Figura V.2 – Trajetória do vetor espacial instantâneo tensão na barra infinita.

Observa-se a trajetória circular descrita pela extremidade do VEI tensão, pois as tensões no barramento infinito são senoidais como mostra a Figura V.1, e simétricas, nas três fases.

Também tiveram comportamento relevante, relativo aos efeitos transitórios, o ângulo de carga δ indicado na Figura V.3 e o torque eletromagnético indicado na Figura V.4 que mostra as oscilações dessas variáveis até se estabilizarem com os valores indicados na Tabela V-2.

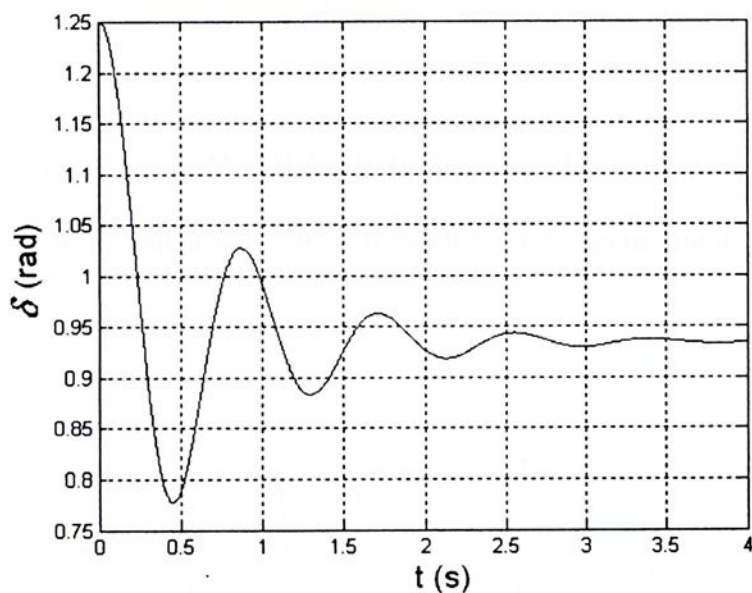


Figura V.3 – Variação do ângulo de carga em função do tempo.

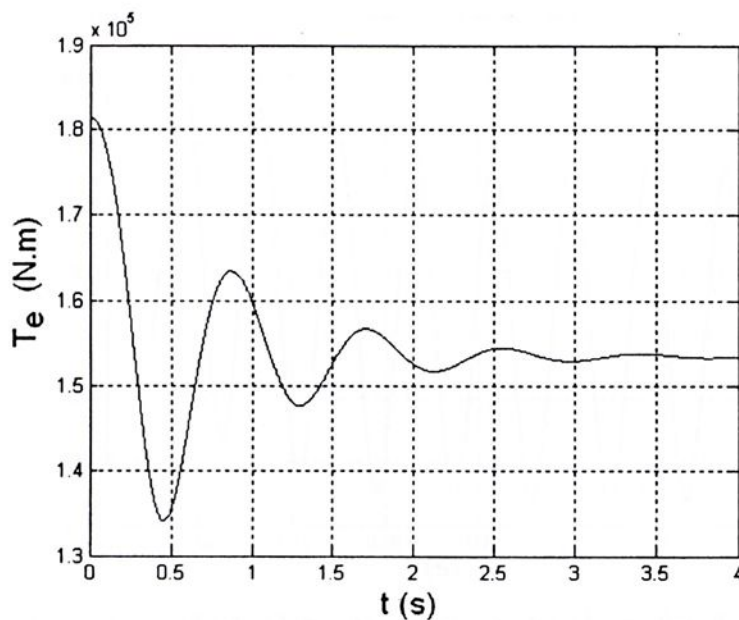


Figura V.4 – Variação do torque eletromagnético em função do tempo.

Nas Figuras (V.5, V.6 e V.7) são mostradas as correntes por fase i_a , i_b e i_c nos terminais da máquina síncrona com as respectivas defasagens angular entre si.

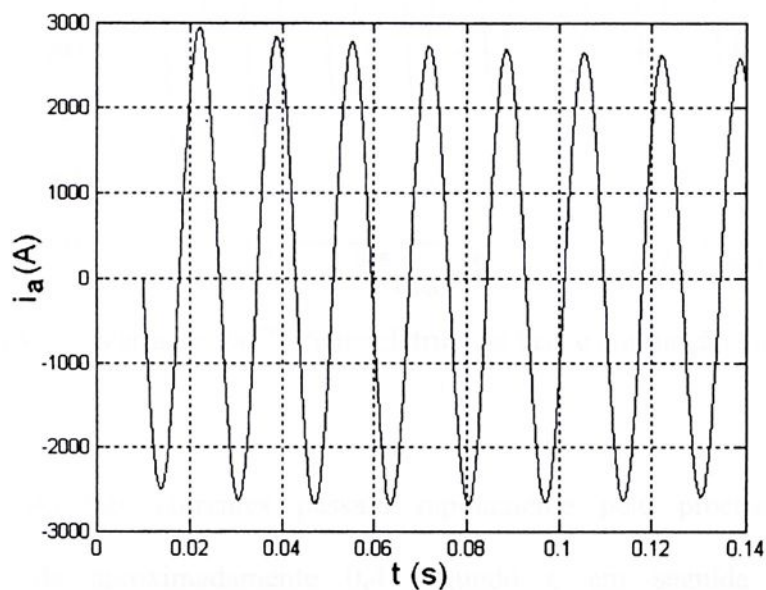


Figura V.5 – Variação da Corrente elétrica na fase a em função do tempo.

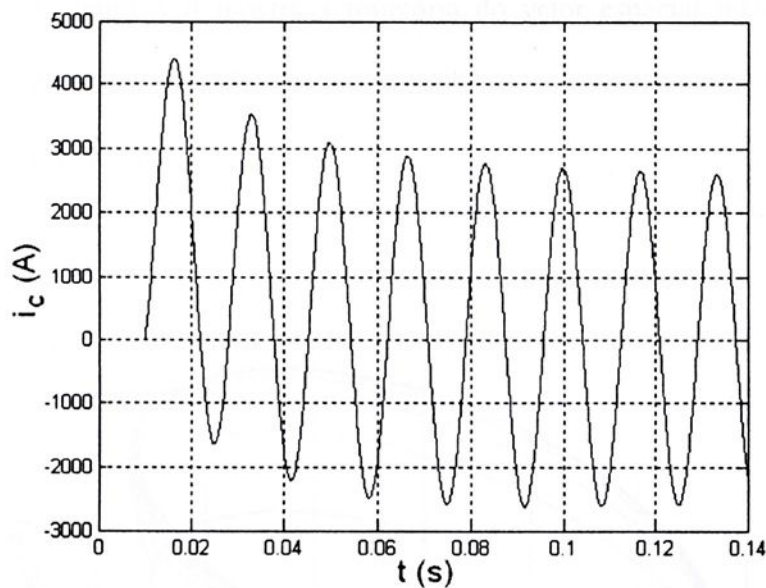


Figura V.6 – Variação da Corrente elétrica na fase b em função do tempo.

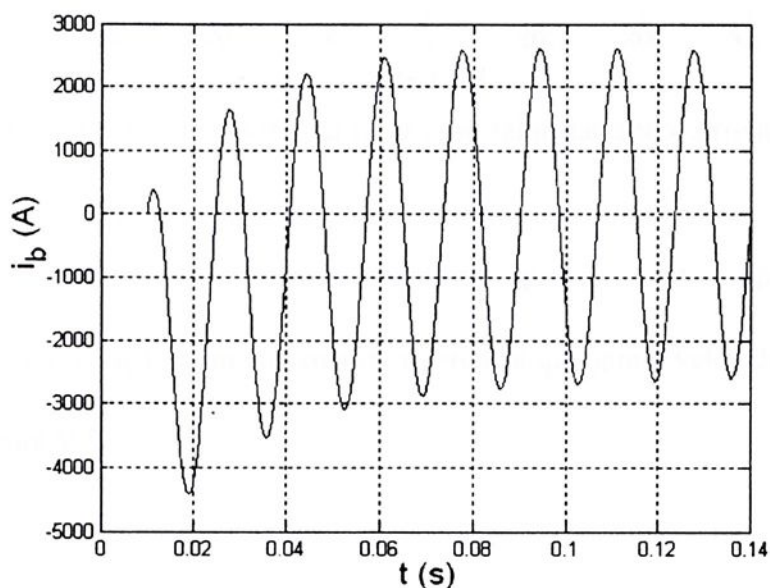


Figura V.7 – Variação da Corrente elétrica na fase c em função do tempo.

As três correntes passam rapidamente pelo processo subtransitório eletromagnético de aproximadamente 0,4 segundo e em seguida pelo transitório eletromecânico com pequena variação das suas amplitudes neste último caso.

A figura V.8 mostra a trajetória do vetor espacial instantâneo corrente. Trata-se de uma trajetória inicialmente não circular, com início no ponto de coordenadas $[0,0]$ que tende a um círculo.

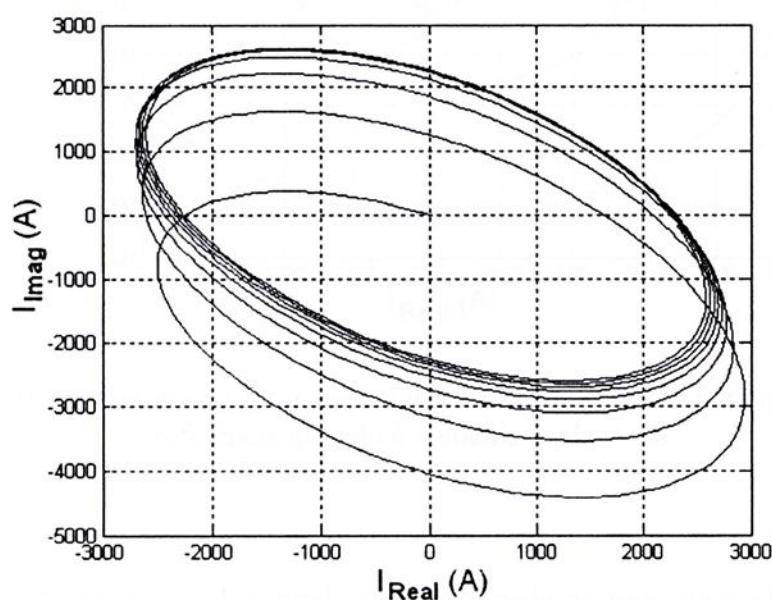


Figura V.8 – Trajetória do vetor espacial instantâneo corrente.

Com o mesmo período transitório aparece o vetor espacial instantâneo corrente tomado em relação a um sistema de referência que gira à velocidade síncrona ω_s , mostrado na figura V.9.

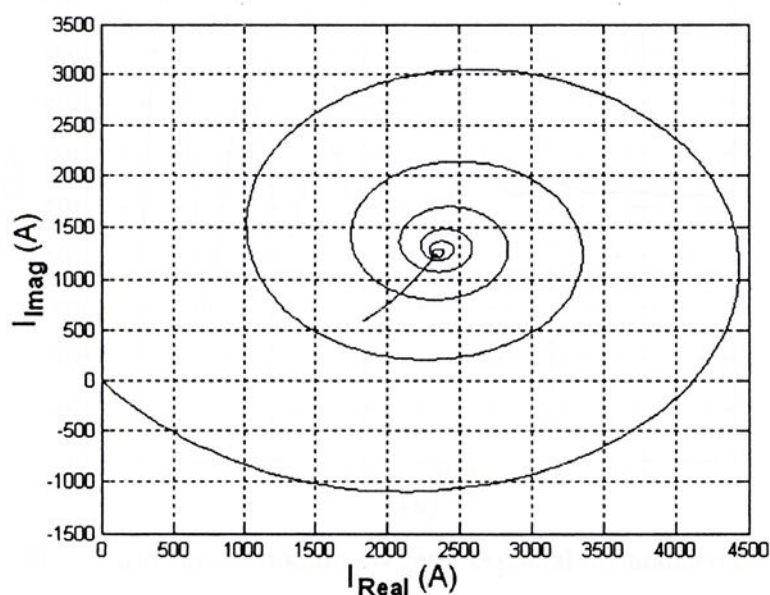


Figura V.9 – Trajetória do vetor espacial instantâneo corrente para um sistema de referência girando à velocidade síncrona.

A trajetória em espiral está relacionada ao transitório eletromagnético e a trajetória semicircular, ao transitório eletromecânico. Cada ponto deste semicírculo refere-se a um determinado valor do ângulo δ .

A Figura V.10 mostra a variação da amplitude do vetor espacial instantâneo corrente. Milanez [08] demonstrou que as perdas por efeito Joule no estator e no sistema de alimentação podem ser dados em função da amplitude deste vetor.

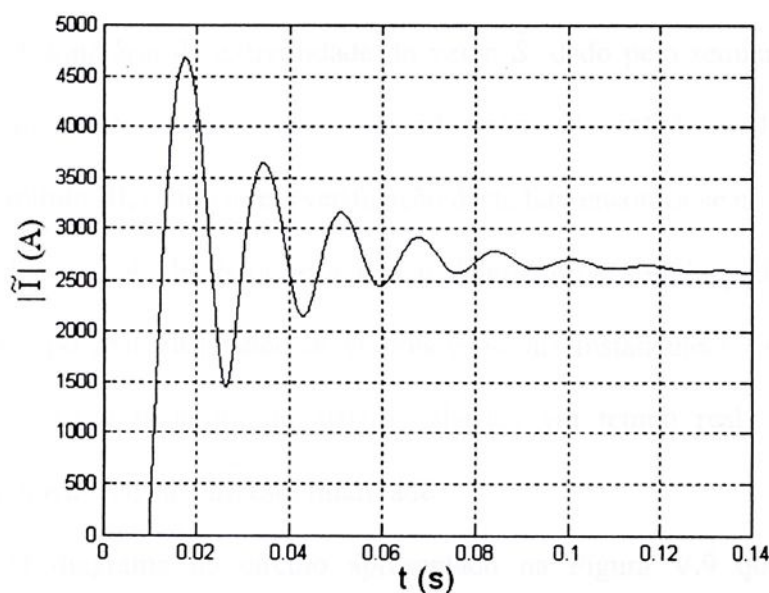


Figura V.10 – Variação do módulo do vetor espacial instantâneo corrente.

A potência complexa instantânea $\tilde{S}$ vista na Figura V.11 possui uma trajetória que se assemelha à do vetor espacial instantâneo corrente; inicia o processo transitório com o transitório eletromagnético predominante e com oscilações com amplitudes mais acentuadas e que gradativamente diminui passando ao transitório eletromecânico caracterizado pelo semicírculo.

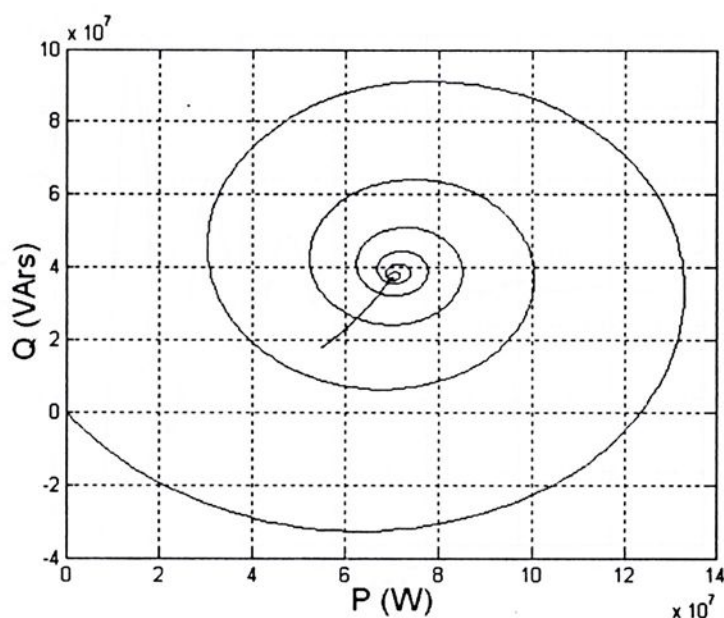


Figura V.11 – Variação da potência complexa instantânea.

A trajetória da extremidade do vetor $\tilde{S}$ dado pelo semicírculo durante o transitório eletromecânico, coincide com o círculo teórico levantado conforme o método apresentado no capítulo III, sendo que a verificação deste fato encontra-se no apêndice A.

Este resultado demonstra que o diagrama de círculo pode ser levantado “on-line” e em tempo real, utilizando-se vetores espaciais instantâneos. Isto possibilita a monitoração, proteção e manobra do sistema elétrico em tempo real; constituindo-se, portanto, em uma nova técnica para esta finalidade.

O diagrama de círculo apresentado na Figura V.9 que caracteriza a variação do vetor espacial instantâneo corrente mostra que este se comporta como um fasor durante o transitório eletromecânico, ou seja, o mesmo diagrama poderia ser traçado calculando-se ponto a ponto o fasor corrente para vários valores do ângulo δ ; usando o método clássico mostrado no capítulo III.

As Figuras V.12, V.13 e V.14 apresentam respectivamente as variações das potências real, imaginária e magnética desenvolvidas.

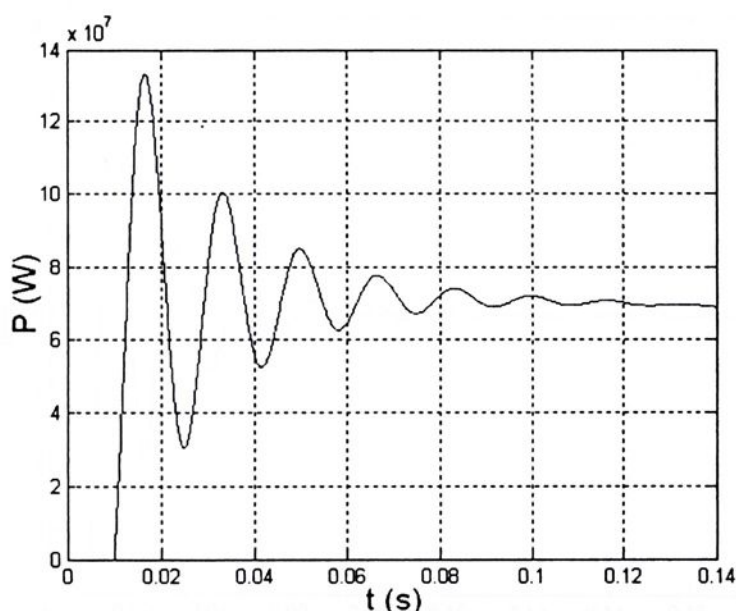


Figura V.12 - Variação potência real em função da do tempo.

As potências real e imaginária são respectivamente as projeções nos eixos real e imaginário da curva da potencia complexa instantânea apresentada na Figura V.11.

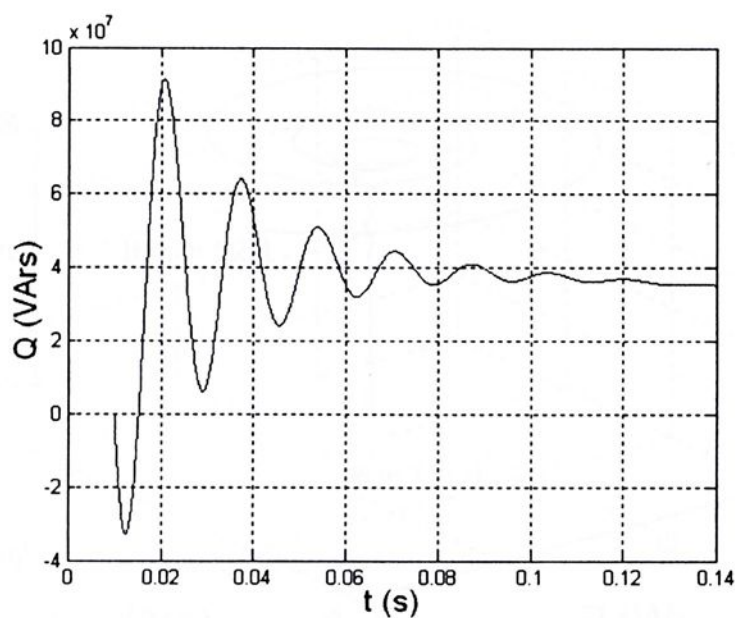


Figura V.13 – Variação da potência imaginária em função do tempo.

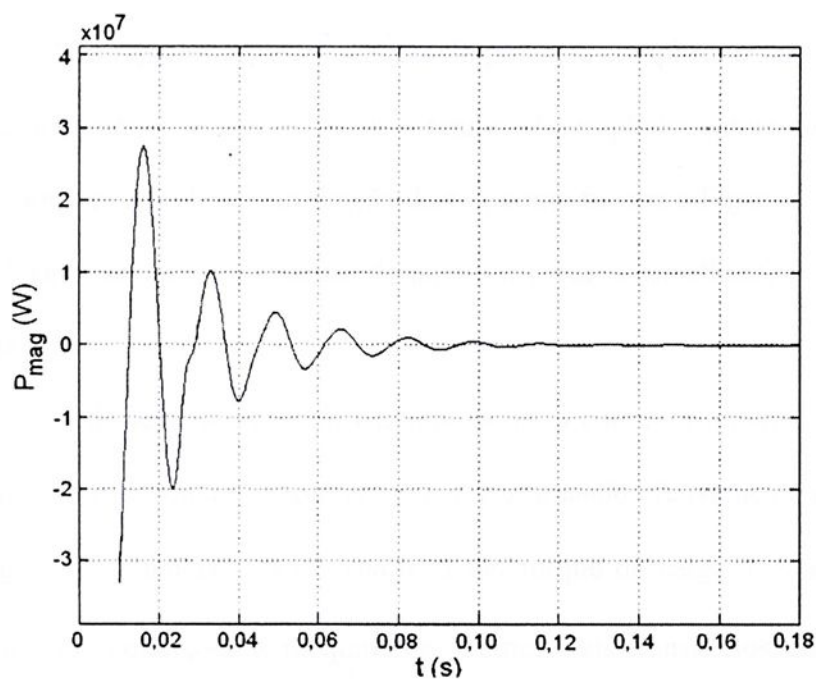


Figura V.14– Variação da potência magnética em função do tempo.

Ao entrarem em regime permanente estas potências assumem um valor constante (Tabela V-2).

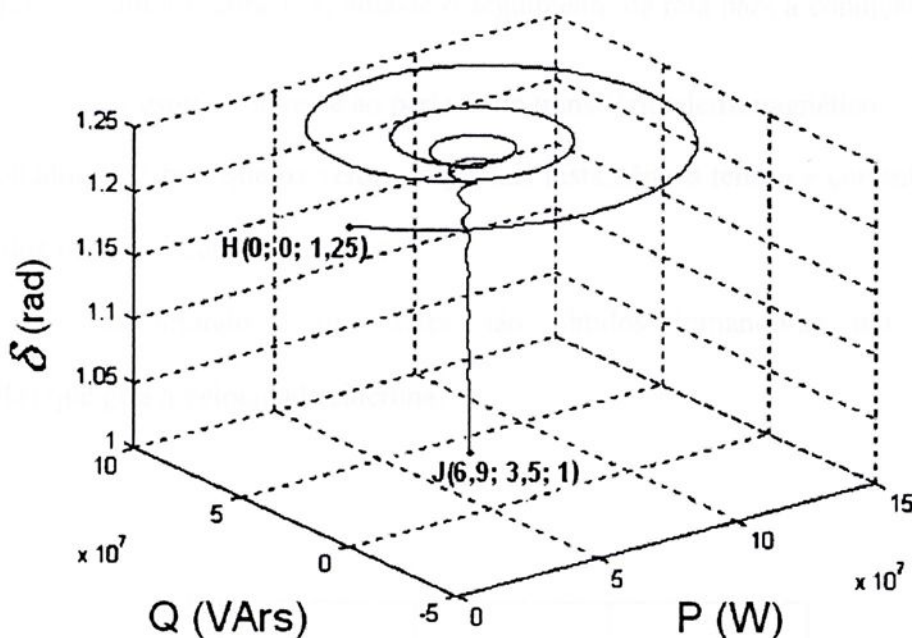


Figura V.15 - Curva representativa das Potências Real e Imaginária da Máquina Síncrona em função do Ângulo de Potência.

Nas representações anteriores da potência complexa e suas componentes, a potência real e imaginária, o ângulo δ ou o tempo são implícitos, portanto é interessante representarmos aquelas grandezas em função destas, como mostra a Figura V.15 (variação da potência complexa instantânea em função do ângulo δ), curva semelhante poderia ser obtida em função do tempo.

Pode-se observar com exatidão sobre a curva da Figura V.15, o ponto de iniciação do processo de sincronização $H(0; 0; 1,25)$, quando efetivamente as potências são nulas e o ângulo de potência $\delta = 1,25 \text{ rad}$ para um torque de carga $T_L = 153.509,72 \text{ N.m}$. Portanto, para estas condições a máquina se submete aos transitórios eletromagnético e eletromecânico. Após esse processo de sincronização até a estabilidade da máquina em

regime permanente, tem-se os valores das grandezas envolvidas, as quais são representadas no gráfico da Figura V.15 pelo ponto $J(6,9; 4; 1)$.

A Figura V.16 a seguir, apresenta a variação da impedância instantânea.

Comparando-se com a Figura V.3, nota-se o seguimento de reta para a condição $E_A/E_B = 1$.

A espiral refere-se ao período do transitório eletromagnético.

Estes resultados mostram que os vetores espaciais instantâneos tensão e corrente podem ser considerados fasores durante o transitório.

Lembrando-se que estes são obtidos tomando-se um sistema de coordenadas que gira à velocidade síncrona.

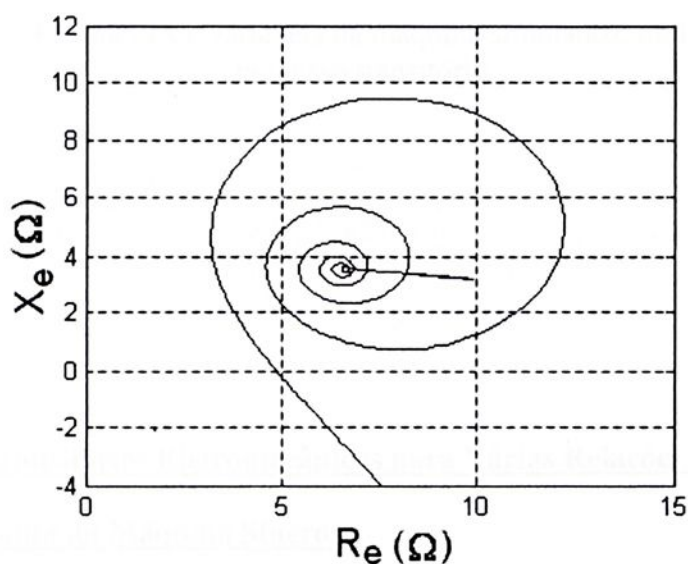


Figura V.16 – Variação da impedância equivalente instantânea.

A relação entre o vetor espacial instantâneo tensão e o vetor espacial instantâneo corrente é a impedância equivalente instantânea vista do ponto de medição dessas grandezas.

Ressalta-se aqui que esta impedância pode ser calculada alternativamente pelo método de Milanez apresentado na seção II.3.

Em seguida são apresentados na Tabela V-2 os valores numéricos referentes aos parâmetros e às variáveis elétricas obtidos ao final do transitório.

GRANDEZA	MÓDULO	GRANDEZA	MÓDULO
δ	0,93 rad	Z_{inst}	9,3 Ω
T_e	1,53 x 10 ³ N.m	Z_{eq}	8,7 Ω
$ \tilde{I} $	2,14 KA	P	6,9 x 10 ⁷ W
$\dot{I}$	2,15 KA	Q	3,5 x 10 ⁷ V.Ars
$ \tilde{V} $	20 KV	$ \tilde{S} $	6,45 x 10 ⁷ VA

Tabela V-2 - Parâmetros e variáveis da máquina simulados, obtidos no final do processo transitório.

V.2. Análise de Transitórios Eletromecânicos para Várias Relações de Tensão de Entrada e Saída da Máquina Síncrona

Os sistema elétricos de potência tem como função a viabilização do fornecimento da energia elétrica desde sua geração até o consumidor final, com qualidade e eficiência ao menor custo possível de produção para que seus serviços tornem-se mais acessíveis à sociedade. As várias relações entre a tensão no barramento transmissor (tensão

de saída) V_s , e a tensão interna da máquina, E , caracterizam diversas condições de operação relacionadas com a potência transmitida e com as perdas.

Estuda-se neste capítulo os resultados dessas variações as quais apresentam-se conforme previstas teoricamente no capítulo III. Considerando apenas o transitório eletromecânico da máquina construiu-se os gráficos representados pelas Figuras (V.17, V.18 e V.19).

Inicialmente examina-se o transitório da máquina, analisando graficamente o vetor espacial instantâneo corrente para as diversas relações de tensão.

A Figura V.17 mostra as várias curvas geradas.

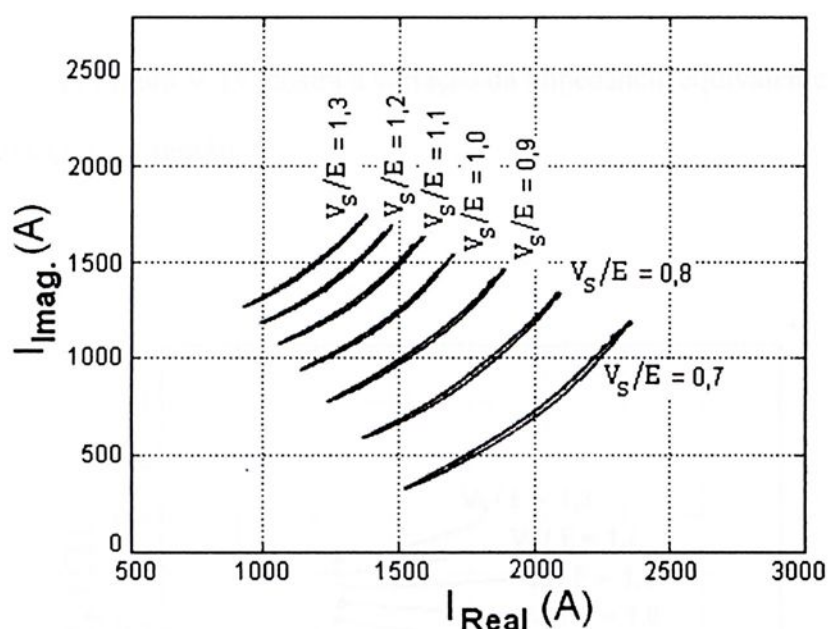


Figura V.17 – Variação do vetor espacial instantâneo corrente para as várias relações de tensão.

Observa-se o comportamento das curvas referentes aos transitórios devido a cada relação de tensão. A Figura V.18 a seguir, mostra a variação da potência complexa instantânea para várias relações de tensão V_s/E a partir de $V_s/E = 0,7$ a $V_s/E = 1,3$.

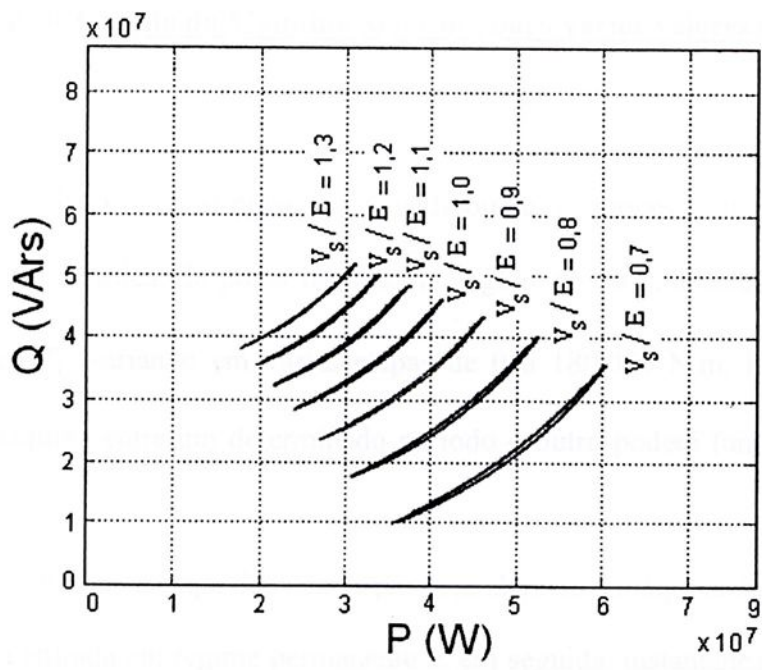


Figura V.18 – Variação da Potência Complexa Instantânea.

A Figura V.19 mostra a variação da impedância equivalente instantânea para várias relações de tensão.

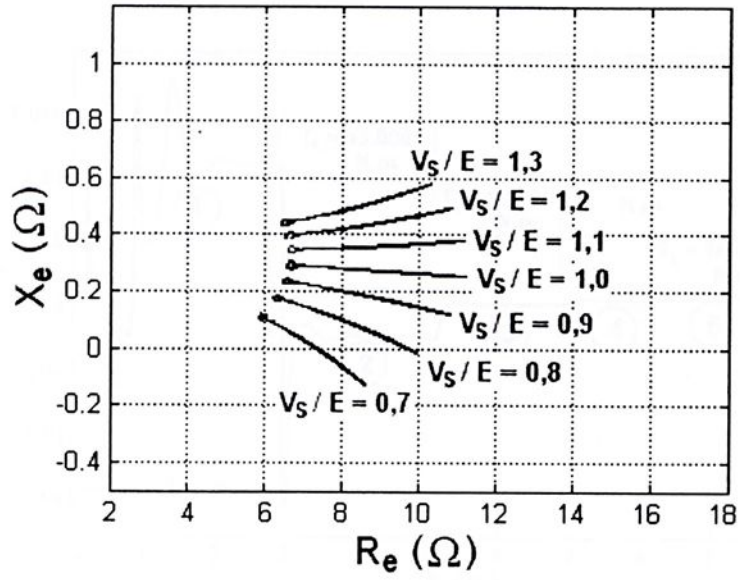


Figura V.19– Impedância Equivalente Z_{eq} para as várias relações de na máquina síncrona.

V.3. Diagramas de Círculo da Máquina Síncrona para vários valores de carga

Para esta simulação, considerou-se o processo transitório para uma máquina síncrona trifásica, de pólos lisos com ângulo de carga constante, $\delta = 1,25 \text{ rad}$ e torque de carga T_L variando em várias etapas de 0 a 180.000 N.m. Durante o processo transitório a máquina entre um determinado período e outro poderá funcionar como motor ou gerador.

Em cada etapa da simulação considera-se a máquina durante seu processo transitório até a entrada em regime permanente e, em seguida, instantaneamente, faz-se uma alteração súbita do torque de carga no eixo da máquina analisando-se o parâmetro indutância e os demais parâmetros mostrados a seguir:

Pode-se observar o comportamento da máquina de acordo com a curva da indutância L na Figura V.20 para várias variações do torque.

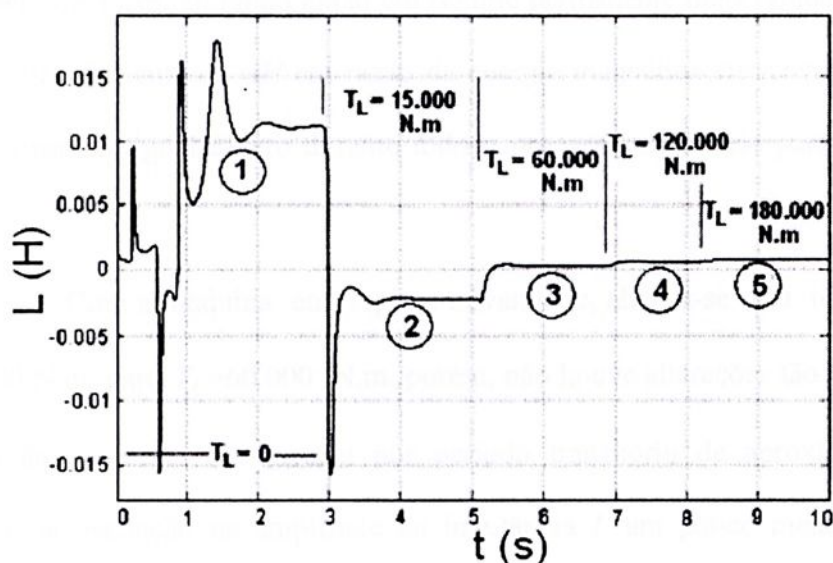


Figura V.20– Variação da Indutância na variação do torque de carga em função do tempo.

Analisando o desempenho da máquina no processo transitório relativo à sua indutância L e, de acordo com os pontos anotados no gráfico da Figura V.20, fez-se as seguintes observações:

1. Inicialmente adotando o torque de carga $T_L = 0$, verificou-se que o processo transitório visto através da indutância L , passou por um período de aproximadamente 2,9 segundos. Antes do transitório houve também um período subtransitório bem representativo, aproximadamente 1,0 segundo e no final do transitório até a entrada em regime permanente, a indutância medida na máquina foi aproximadamente 10,42 mH .

2. Logo que a máquina entra em regime com $T_L = 0$, alterou-se subitamente o torque de carga T_L , para $T_L = 15.000$ N.m e, novamente a máquina iniciou um processo transitório, sendo que teve um comportamento bem diferenciado em relação ao processo anterior (1), isto é, notou-se essa vantagem pelo período transitório, que é bem menor, com aproximadamente 2,2 segundos e um período subtransitório desconsiderado. E o mais importante é que durante o transitório mais crítico, a indutância L apresentou oscilações com amplitudes bem menores, entrando então em regime permanente mais rapidamente com um valor de aproximadamente -5 mH em razão da energia magnética armazenada na máquina permanecer constante igual a zero durante todo o processo transitório para este torque de carga T_L .

Com a máquina em regime novamente, alterou-se seu torque de carga de $T_L = 15.000$ N.m, para $T_L = 60.000$ N.m, porém, não houve alterações tão significantes no desempenho da máquina, que passou por período transitório de aproximadamente 1,7 segundos e uma oscilação na amplitude da indutância L um pouco menor que no caso anterior (2), também o subtransitório pode ser desprezado, com a indutância da máquina chegando a 0,02 mH .



4. Com a máquina em regime, novamente alterou-se ainda mais seu torque de carga de $T_L = 60.000 \text{ N.m}$ para $T_L = 120.000 \text{ N.m}$. Nessa intervenção houve um transitório semelhante ao anterior (3), com um período transitório de aproximadamente 1,4 segundos e a oscilação da amplitude da indutância L , também semelhante ao caso anterior (3), e com um processo subtransitório desconsiderado.

5. Finalmente, tomando como base o processo anterior, com a máquina em regime permanente, alterou-se seu torque de carga $T_L = 120.000 \text{ N.m}$ para $T_L = 180.000 \text{ N.m}$, portanto, ocorreu um processo transitório de aproximadamente 1,8 segundos.

O diagrama da Figura V.21 apresenta a variação do ângulo de torque δ .

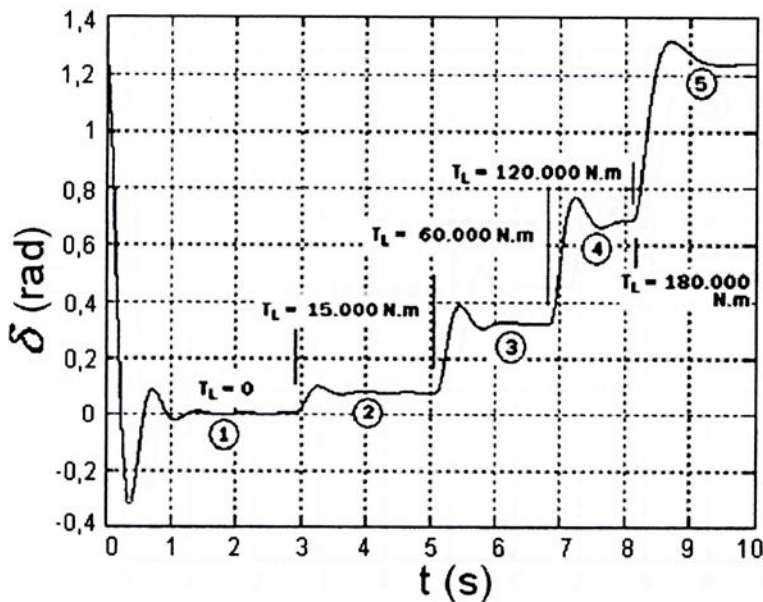


Figura V.21 – Variação do Ângulo de carga em cada etapa do processo transitório devido à variação da carga, em função do tempo.

Como pode se certificar, nas cinco etapas, apesar de provocadas intencionalmente grandes variações crescentes nos torque de carga da máquina, as indutâncias correspondentes com

exceção do caso (1), se alteraram com o tempo de forma proporcional, com pequenas variações relativas.

Foi notado também que essas variações crescentes e bruscas nos torques de carga, provocaram respectivos transitórios e oscilações nas amplitudes, valores também crescentes e com variações proporcionais. E para este torque de carga T_L , há uma indutância L aproximadamente $1,2\text{ mH}$, isto significa que a máquina está absorvendo parte da energia magnética armazenada E_m .

O diagrama da Figura V.22 apresenta a variação do torque eletromagnético

T_e .

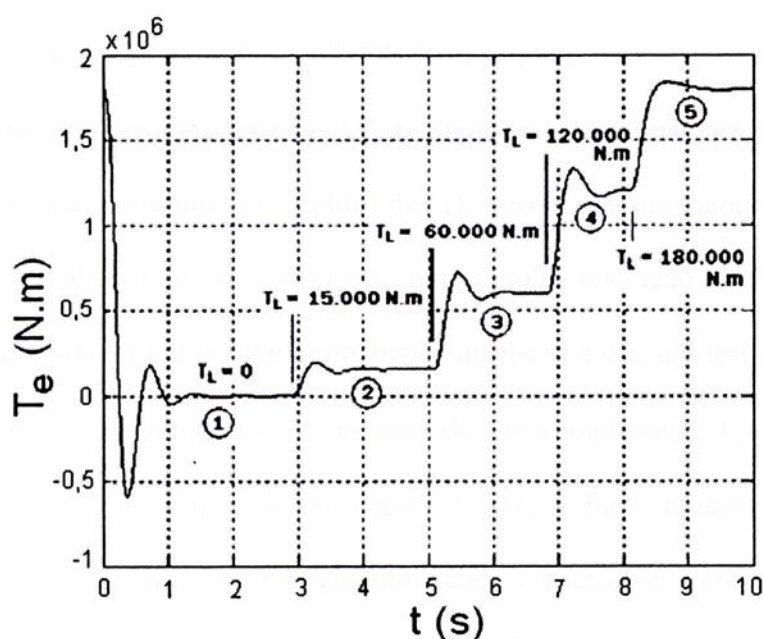


Figura V.22 – Variação do Torque eletromagnético nos transitórios de variação de carga em função do tempo.

Verifica-se que a máquina se encontra inicialmente a vazio, com um ângulo de carga $\delta = 1,25\text{ rad}$. O ângulo de torque no final do transitório será constante, $\ddot{\alpha} = 0$, apesar de haver um período transitório de aproximadamente 1,8 segundo. Saindo do

transitório, conseqüentemente a máquina entra em regime e se estabelece com sua energia magnética armazenada constante com valor próximo de zero (ver Figura V.27), isto é, constante a partir de uma instante dentro do transitório (aproximadamente 1,5 segundo do início do processo transitório) relativo á indutância da máquina (Figura V.20) mais o tempo de regime até o ponto em que se variou o torque de carga T_L . Logo após a máquina entrar em regime, aplica-se subitamente a ela um torque de carga $T_L = 15.000 \text{ N.m}$ e, em conseqüência ocorreu uma variação menor no ângulo de torque no final do transitório α_F , uma oscilação menor na sua amplitude e um período transitório de aproximadamente 0,8 segundo e com tudo isso a energia magnética armazenada permaneceu constante em função da variação do torque de carga (2) ter variado pouco em proporção ao torque de carga para a máquina em condições normais de operação. Quando saiu do transitório (3), subitamente variou-se o torque de carga para $T_L = 60.000 \text{ N.m}$, o que provocou na máquina um novo período transitório de aproximadamente 1,0 segundo e, mais uma vez têm-se a energia magnética armazenada, constante nos moldes de (1), pois, a máquina ainda funciona com o torque de carga bem abaixo do necessário para um ponto de operação satisfatório. Mas, por outro lado, com a máquina em regime permanente sugere-se a ela, um torque de carga $T_L = 120.000 \text{ N.m}$, onde ocorreu um período transitório de aproximadamente 1,3 segundo, porém, com oscilações maiores na amplitude do ângulo de torque final, todavia, para este torque tivemos uma pequena variação na energia magnética armazenada (aproximadamente 0,3 segundo) durante o início do transitório e daí para frente se estabilizou e permaneceu constante até a próxima variação no torque de carga da máquina. Não seria agora, muito diferente com um súbito torque de carga $T_L = 180.000 \text{ N.m}$, para um período transitório de aproximadamente 1,3 segundo, só que desta vez a energia magnética armazenada percebeu um transitório, aproximadamente 0,3 segundo e com oscilações de amplitudes pequenas,

como nos casos (1), (2), (3) e (4) e que após entrar em regime houve uma pequena queda no ângulo de torque final δ_F , pois desta vez a variação do torque foi bem maior em relação as anteriores, com um valor acima do estabelecido para as condições normais muito próximo de zero e que poderá ser desprezível.

O gráfico da Figura V.22 mostra o desempenho da máquina relativo ao torque eletromagnético no final do processo transitório em função das variações no seu torque de carga T_L no intervalo de 0 a 180.000 *N.m*.

Analisando o gráfico da Figura V.23, representativo da Potência Complexa Instantânea e, quando tomado um ponto qualquer na trajetória dessa curva, onde cada ponto desses corresponde a um instante de tempo, o qual é uma variável implícita.

Observa-se neste gráfico que as variações do torque não alteram a trajetória na região do semicírculo, apesar de a variação da energia magnética armazenada ser significativa devido às variações do torque.

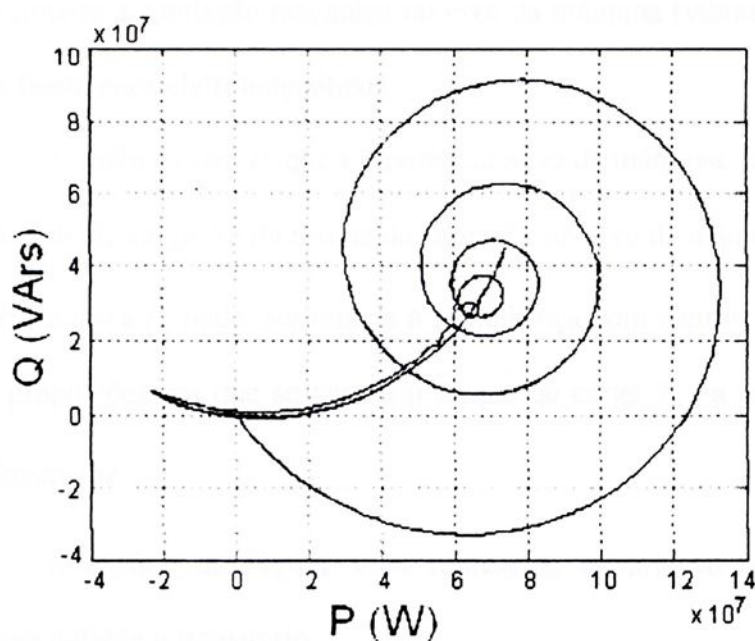


Figura V.23 – Variação da Potência complexa instantânea.

O gráfico da Figura V.23, mostra que durante o transitório a potência complexa instantânea $\tilde{S}$, varia como mostra a curva representativa. À direita do eixo y tem-se a potência ativa, então nesse ponto a máquina está funcionando como motor. Dividindo esta curva em quadrantes, assume-se que, quando no primeiro quadrante ou quarto, a máquina está funcionando como motor e recebendo potência ativa.

Pode-se fazer uma interpretação comparando com o gráfico da corrente nas fases a , b e c , verificou-se que esses três ciclos se referem ao transitório eletromagnético, depois, esses outros ciclos seguintes, que parecem ser um plano horizontal, mas, que representa uma perspectiva no plano horizontal, se refere à oscilação mecânica (há uma variação do ângulo δ) no rotor da máquina e faz causar esta variação na potência absorvida pela máquina. Embora tenha oscilação mecânica, predomina-se aqui o efeito eletromagnético e, que tem oscilação mecânica o tempo todo (o ângulo δ sempre variando) o rotor da máquina oscila, até que ela entre em regime permanente, porém, estes três primeiros ciclos são mais caracterizados pelo fenômeno eletromagnético e os ciclos restantes predomina-se a oscilação mecânica no eixo da máquina (vibração mecânica), aí já não aparecem os fenômenos eletromagnéticos

A potência real P , que é a potência ativa da máquina, tem seu desempenho em função do ângulo de carga δ e do torque de carga T_L no eixo da máquina. De acordo com a curva da potência ativa P , pode ser notada a semelhança com a curva do ângulo de carga δ , isto é, nas proporções em que se variou o torque de carga T_L , a potência passou a se comportar graficamente.

A gráfico da Figura V.24 representa a variação da potência real na máquina síncrona durante o transitório.

A conceito de potência imaginária Q , apesar de inicialmente defendida por Akagi [05] e com aplicações dos conceitos de Milanez [06-08], ainda é muito discutida no



meio científico pelos estudiosos do assunto. Mas, por outro lado, é importante observar que a esta forma de potência está associada à energia magnética armazenada na máquina.

Qualquer máquina motriz que utiliza meios eletromagnéticos para fornecimento ou recebimento de energia elétrica, possui esse fenômeno que está

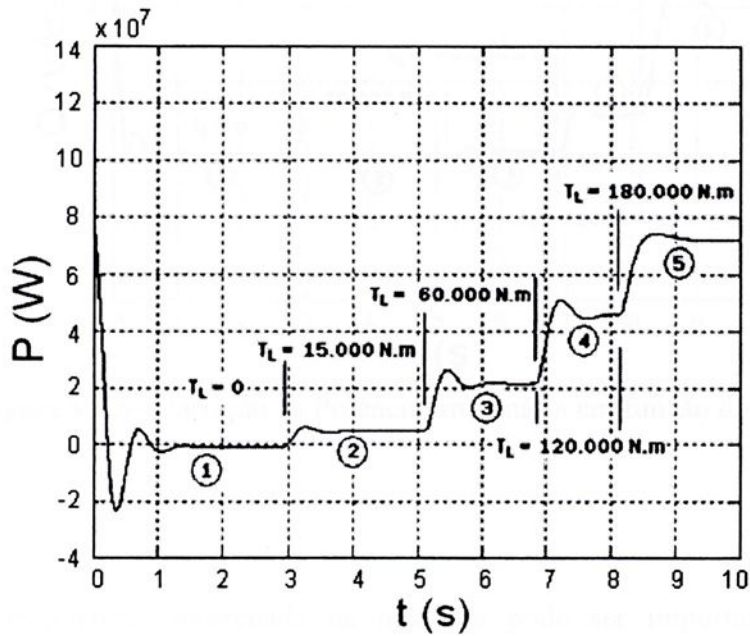


Figura V.24 – Variação da Potência Ativa em função do tempo.

associado à variação da energia magnética armazenada na máquina com a variação das condições de operação.

A Figura V.25 apresenta a variação da potência imaginária na máquina síncrona durante o transitório.

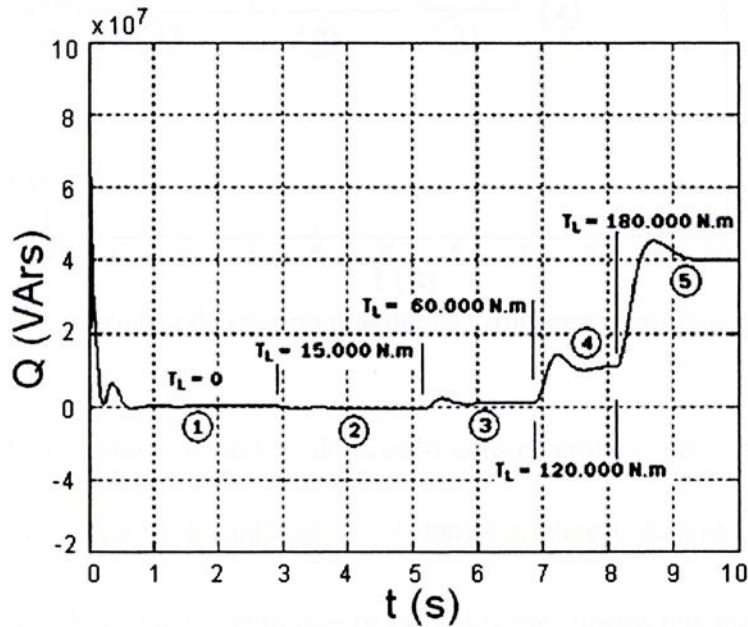


Figura V.25– Variação da Potência Imaginária em função do tempo.

Esta energia magnética armazenada na máquina pode ser importante no estudo dos transitórios da máquina síncrona ou em qualquer processo transitório, como nesse caso, mostrado no gráfico da Figura V.26, onde valores crescentes no torque de carga T_L (0 a 180.000 N.m) com o ângulo de carga inicial constante, $\delta = 1,25 \text{ rad}$ e, mesmo assim a variação da energia assumiu na maior parte do processo transitório e de regime permanente um valor constante e submeteu-se a um pequeno período transitório para os dois valores de torque de carga mais altos e para o valor de torque mais alto (180.000 N.m) a energia magnética armazenada teve uma pequena queda, o que é levado a entender que o sistema começa nesse ponto a absorver a energia armazenada na máquina.

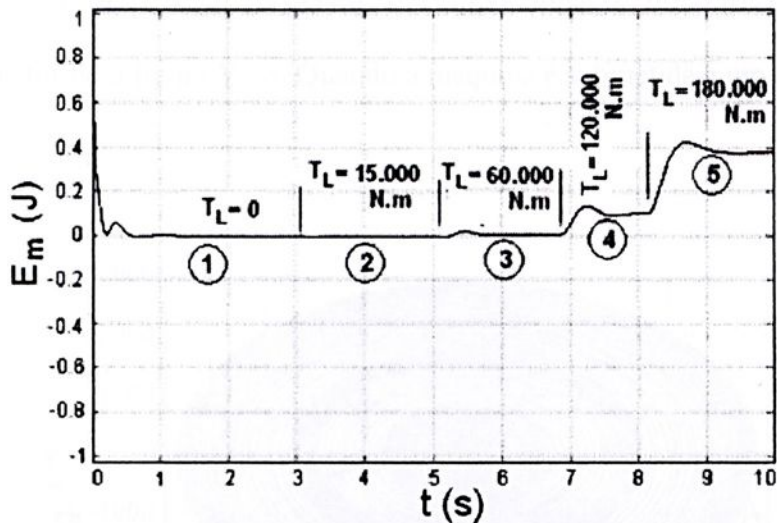


Figura V.26 – Variação da energia magnética armazenada em função do tempo.

É importante observar, de acordo com o gráfico da Figura V.27, que o módulo da corrente complexa instantânea $|\tilde{I}|$ é também função do ângulo de carga δ e da magnitude do torque de carga T_L ; com isso os períodos transitórios que passa a corrente $|\tilde{I}|$, são os mesmos do ângulo de carga δ , assim sendo, diminui-se o módulo da corrente $|\tilde{I}|$.

A Figura V.27 apresenta o módulo da corrente complexa instantânea.

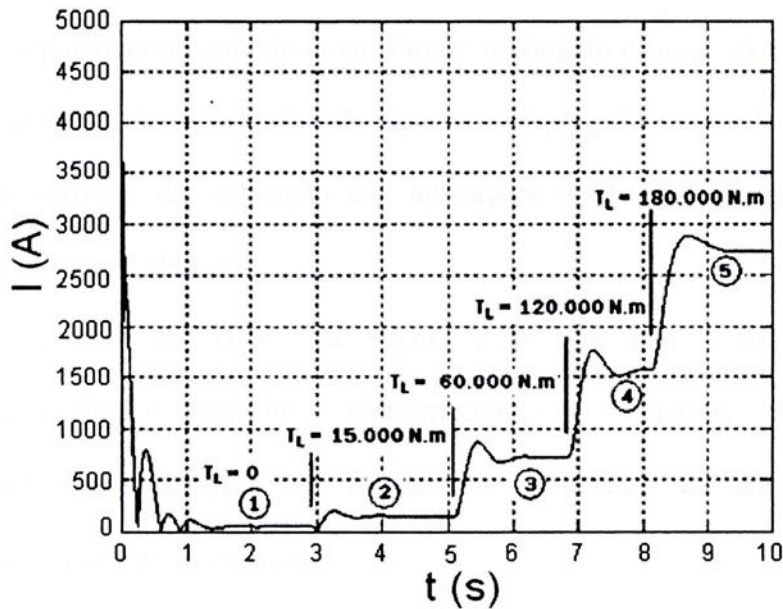


Figura V.27 - Variação do módulo da Corrente Complexa Instantânea em função do tempo.

É importante observar o comportamento, do VEI corrente durante o processo transitório na figura V.28. Quando a máquina é submetida a um torque de carga T_L .

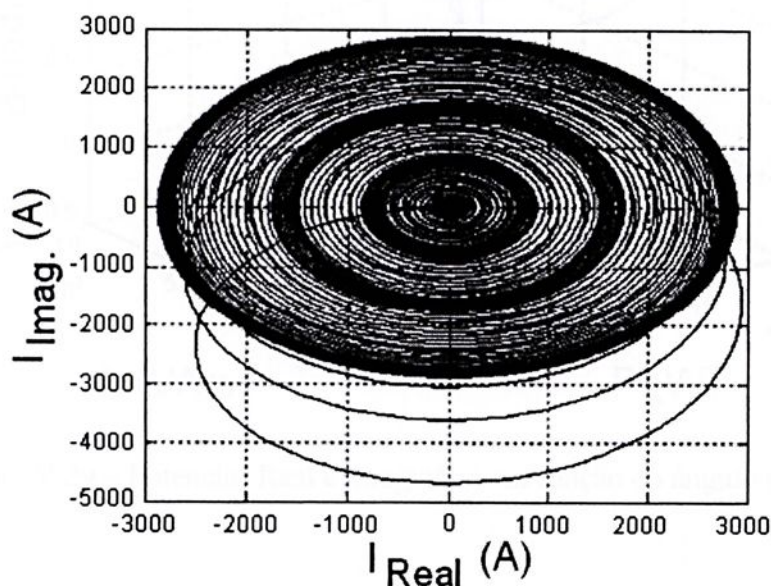


Figura V.28 – Variação do VEI corrente com Ângulo inicial constante e torque variável.

A Figura V.29 mostra a representação espacial dos vetores instantâneos potência real P e potência imaginária Q em função do ângulo de carga. A resolução gráfica vem mostrar ainda mais a exatidão do algoritmo empregado na simulação e mais ainda, as vantagens e certezas da utilização das aplicações da teoria da potência complexa instantâneas nos circuitos elétricos.

A parte da curva da Figura V.29 que tem a configuração de um semicírculo representa o transitório eletromecânico da máquina. Entretanto, este semicírculo tem sua amplitude em função do coeficiente de amortecimento dos enrolamentos amortecedores da máquina

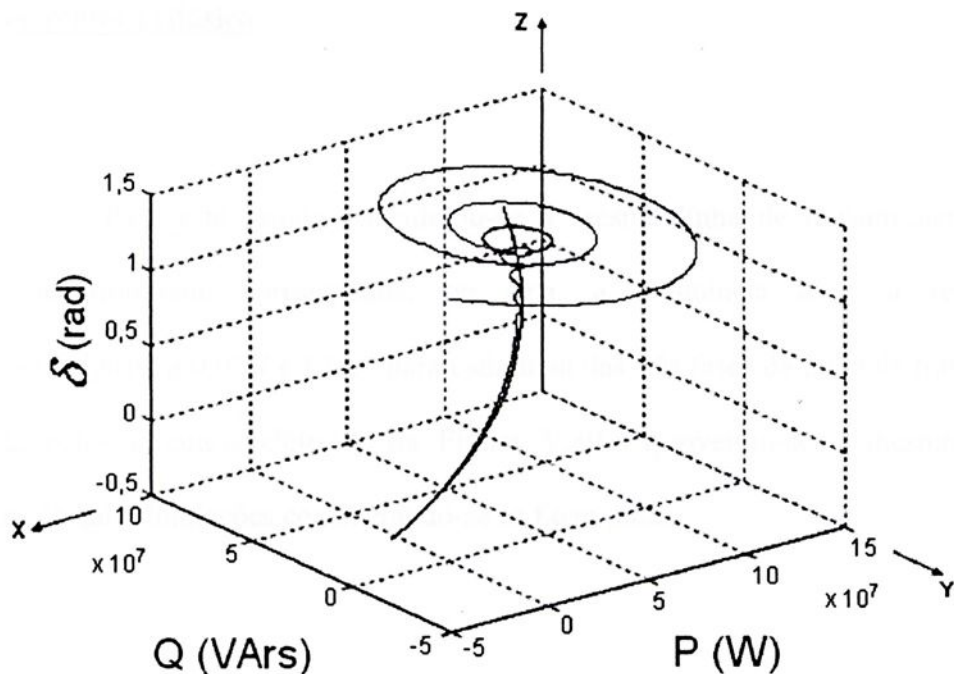


Figura V.29 – Potências Real e Imaginária em função do ângulo de carga.

Durante a variação da carga mecânica aplicada à máquina, a potência complexa instantânea oscila sobre o semicírculo, sem apresentar espirais que caracterizam o transitório eletromagnético, ou seja, as variações de carga provocam oscilações eletromagnéticas de amplitude desprezíveis quando comparadas àquelas quando dos processos de sincronização. O operador do sistema pode distinguir assim muito bem os dois tipos de eventos.

No próximo capítulo analisa-se um caso de curto-circuito franco trifásico no barramento receptor incluindo-se a reatância síncrona da máquina. Trata-se de um caso hipotético de valor apenas teórico para ilustração da forma de variação das grandezas que vêm sendo analisadas neste trabalho.

V.4. Curto-circuito Trifásico

Para este estudo considerou-se a mesma linha de transmissão com os parâmetros anteriormente apresentados, ou seja, a indutância L e a resistência, respectivamente iguais a $0,02H$ e $1,0\ \Omega$ para cada uma das três fases da linha de transmissão, representada pelos circuitos elétricos da Figura V.30. Aproveitou-se o mesmo modelo utilizado nas demais simulações considerando-se as f.e.m.nulas.

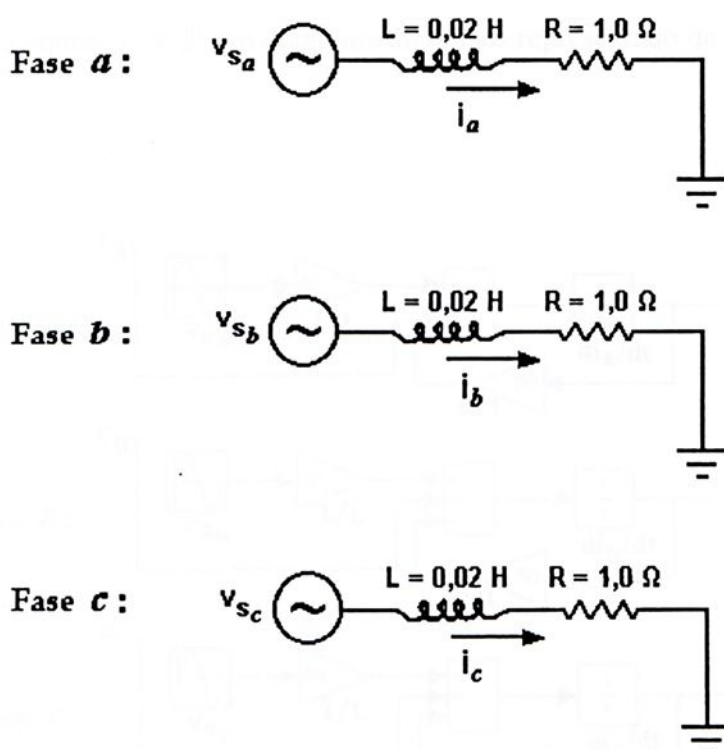


Figura V.30 - Circuito elétrico equivalente para as três fases da linha de transmissão em curto-circuito franco trifásico.

De acordo com os circuitos da Figura V.30 obtêm-se a equação genérica para a tensão por fase:

$$v_s = Ri + L \frac{di}{dt}, \quad (\text{V-1})$$

portanto, isolando o termo da diferencial di/dt tem-se:

$$\frac{di}{dt} = \frac{v_s}{L} - \frac{R}{L} i \quad (\text{V-2})$$

logo, representa-se a equação (V-2) em diagrama de blocos representado na figura V.31:

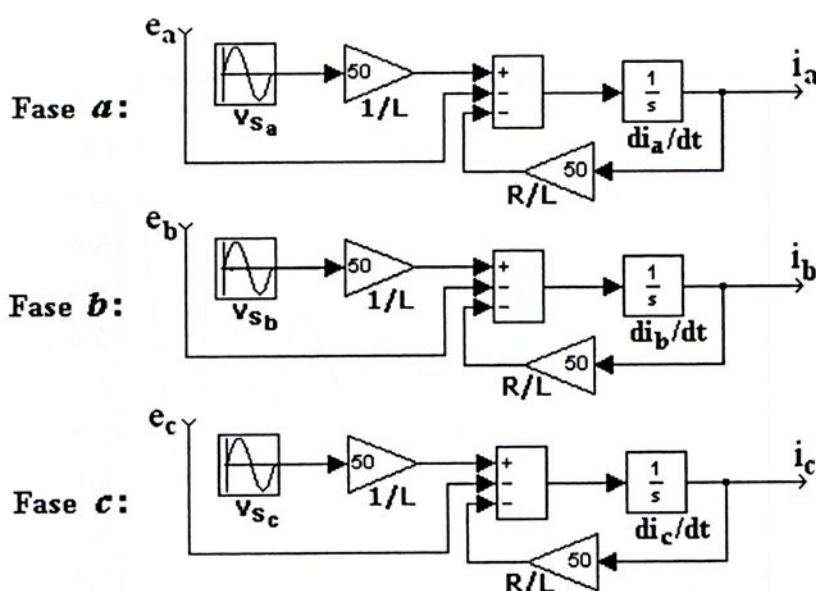


Figura V- 31: Diagramas de blocos representando as três fases da linha de transmissão.

Os resultados da simulação são apresentados nas Figuras V.32 a V.39.

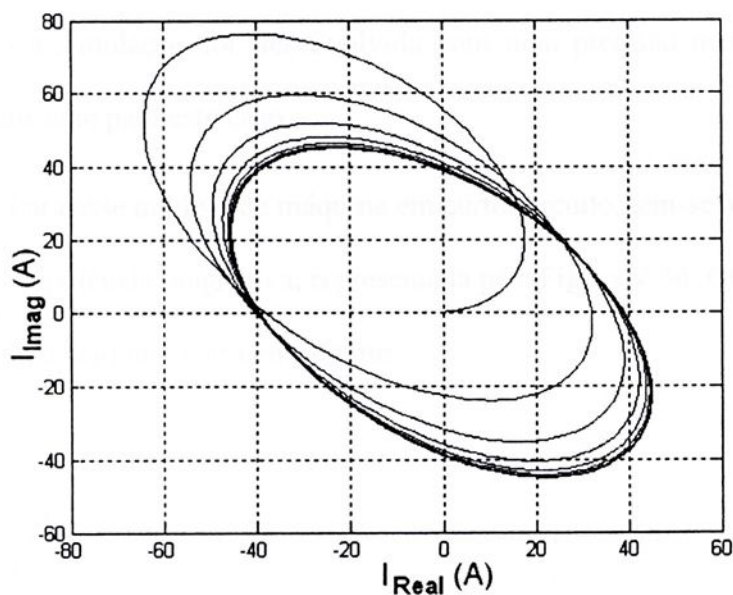


Figura V.32 – Trajetória do VFI corrente durante o curto-circuito franco trifásico.

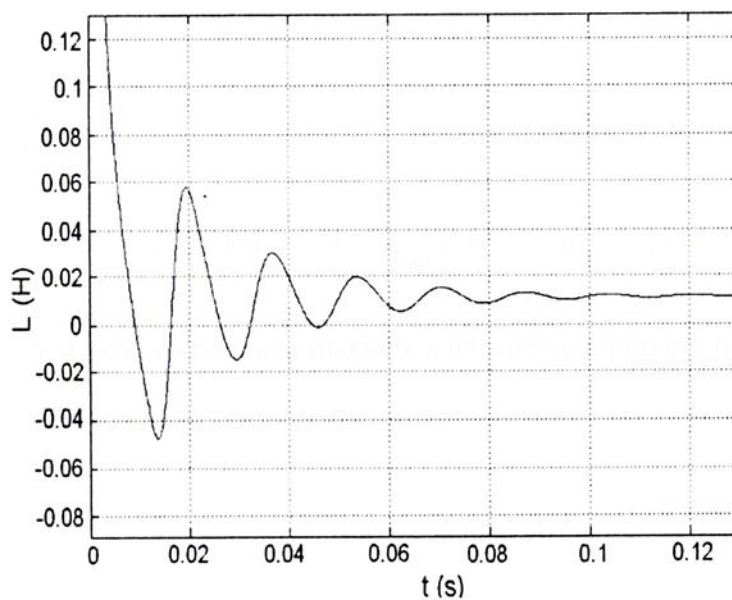


Figura V.33 – Variação da Indutância de curto-circuito em função do tempo.

A Figura V.33 mostra a variação da indutância. O valor de regime esperado é de 20 mH . Este resultado deve-se a problemas numéricos encontrados, principalmente no cálculo da velocidade angular do VEI corrente. Espera-se que as oscilações também diminuam quando a simulação for desenvolvida com uma precisão maior; pois o método prevê um valor constante para este caso.

Para esse modelo de máquina em curto-circuito, tem-se a curva de sua derivada, ou seja, da potência magnética, representada pela Figura V.34. Observa-se que esta tende a zero quando a máquina entra em regime.

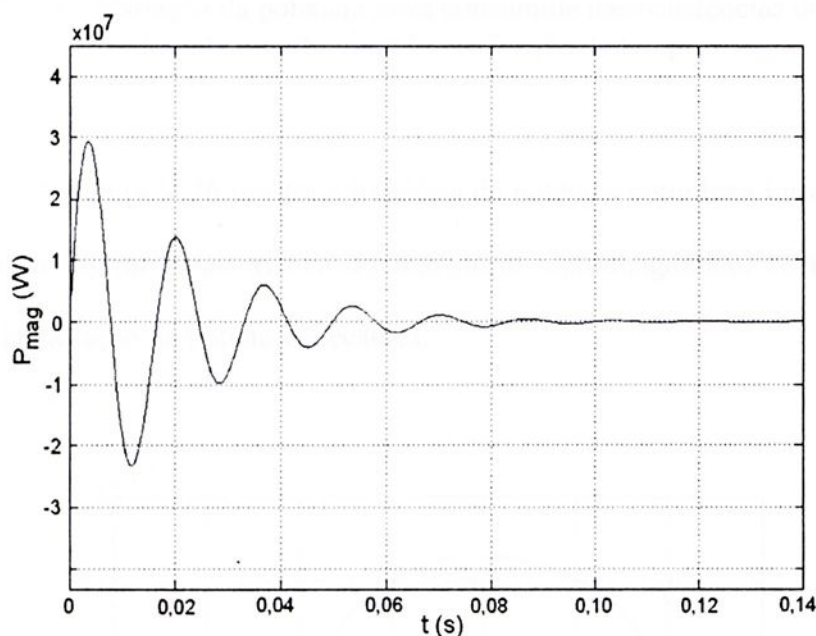


Figura V.34 – Variação da potência magnética de curto-circuito em função do tempo.

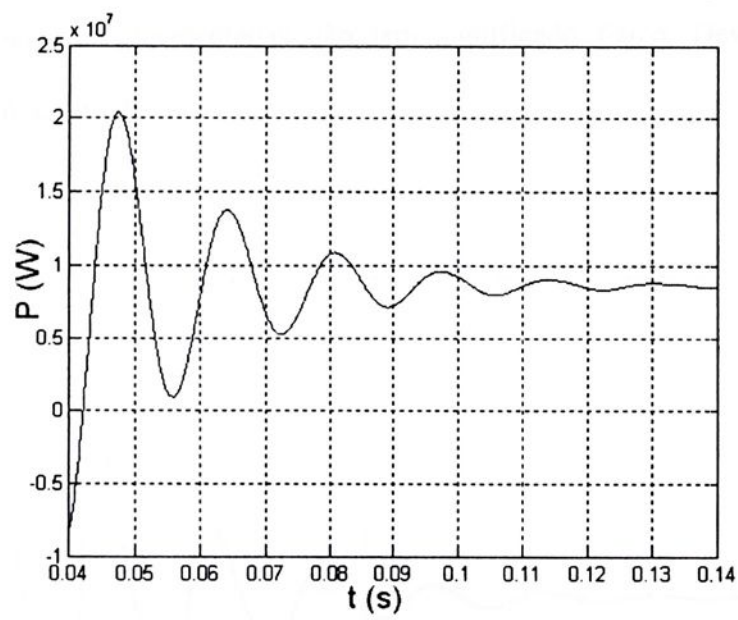


Figura V.35 – Variação da potência ativa consumida nas resistências do circuito durante o curto-circuito em função do tempo.

A Figura V.36 mostra a trajetória da potência complexa instantânea, onde se observa apenas a espiral característica do transitório eletromagnético, sem o semi-circulo característico da variação da potência mecânica.

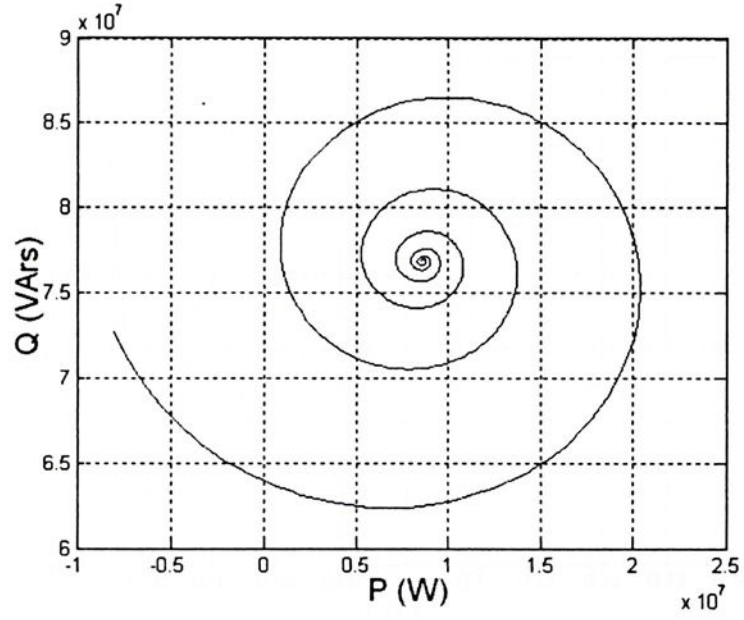


Figura V.36 – Variação da potência complexa Instantânea de curto-circuito.

Na Figura V.37 é mostrada a curva da resistência elétrica dos circuitos da máquina. As oscilações apresentadas não têm significado físico. Devem-se ao método numérico utilizado na simulação.

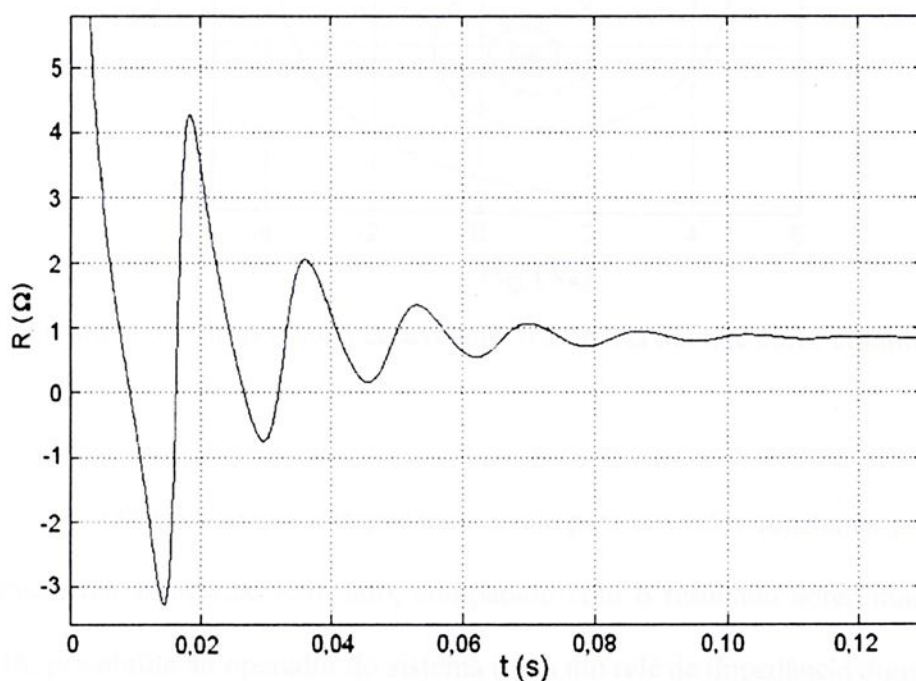


Figura V.37 – Variação da resistência elétrica de curto-circuito em função do tempo.

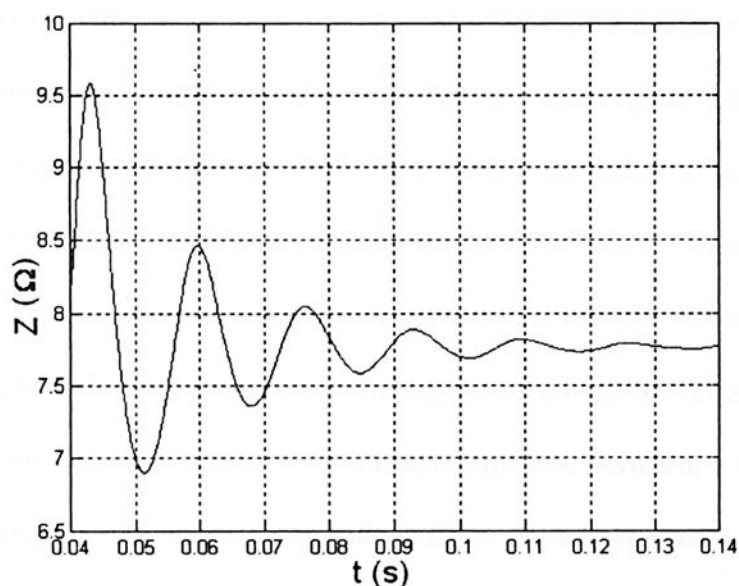


Figura V.38 – Módulo da impedância da linha de transmissão durante o curto-circuito.

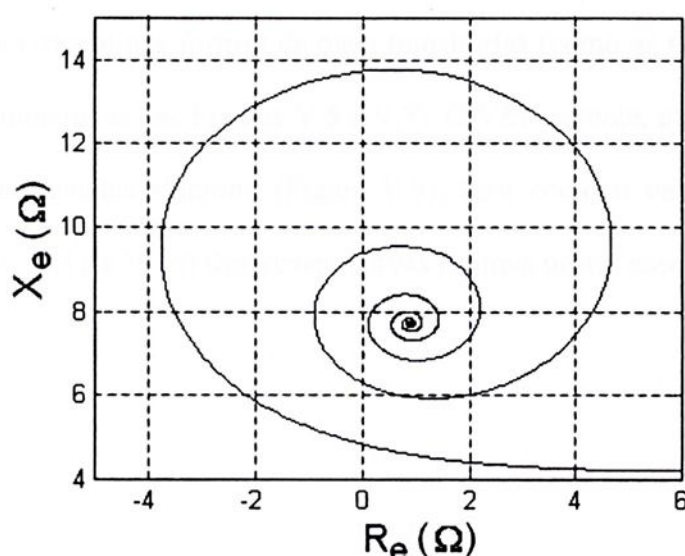


Figura V.39 - Impedância equivalente transitória durante curto-circuito.

Observa-se que a impedância tende para um valor constante, pois não existe potência mecânica associada. Este fato, comparado com o resultado apresentado com o da Figura V.16, possibilita ao operador do sistema (ou a um relé de impedância digital) distinguir entre um curto-circuito trifásico e uma oscilação de potência mecânica na máquina síncrona.

A energia magnética é um parâmetro de importância para avaliação do comportamento da máquina, uma vez que está relacionada aos transitórios da máquina. Esta variável é constante para todos os sistemas elétricos em regime permanente senoidal equilibrado como observa Milanez em [07]. Para transitórios causados por qualquer tipo de perturbação, ou variação das condições de operação, bem como em casos de regimes não-senoidais e/ou desequilibrados, a energia total armazenada nas três fases, internamente nos sistemas elétricos, nos elementos reativos como capacitores, indutores e campos de máquinas elétricas de corrente alternada, varia ou oscila, apresentando, portanto, a derivada não nula. Esta taxa de variação de energia, considerando-se simultaneamente as três fases, é caracterizada como potência real fluindo para fora do sistema elétrico, quando positiva, ou

sendo proveniente de fora, quando com sinal negativo. Está associada às componentes de corrente contínua existente nas formas de onda transitórias (como as que estão presentes nas ondas de corrente mostradas nas Figuras V.5 a V.7). O VEI corrente, quando representado em um sistema de coordenadas síncrono (Figura V.9), bem como o vetor potência complexa instantânea (Figuras V.11 e V.15) descrevem curvas espirais nestes casos.



VI. Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

Esta pesquisa é mais uma das aplicações da Teoria da Potência Complexa Instantânea dentro dos sistemas elétricos de potência. Apesar de termos focado a máquina síncrona, este trabalho é de caráter mais abrangente, pois o objetivo foi a apresentação de um algoritmo que determine parâmetros de circuitos, neste caso, os parâmetros da máquina síncrona, e demais elementos para a análise do comportamento desta em condições de oscilações eletromecânicas, o qual poderá ser utilizado em sistemas de energia em modelos mais sofisticados.

Demonstrou-se neste trabalho que os vetores espaciais instantâneos são úteis para a análise, monitoração e proteção de máquinas síncronas em sistemas de potência. Estes vetores comportam-se como fasores durante o processo transitório eletromecânico. Possibilitam, desta forma, o cálculo da impedância equivalente instantânea em tempo real, podendo servir assim, como elementos para o desenvolvimento de algoritmos para relés digitais de impedância e sobrecorrente e, adicionalmente, como relés direcionais de fluxos de potência.

Destaca-se que o método fornece também elementos de análise para a distinção de eventos em sistemas elétricos de potência, em particular os elementos para a análise de processos de sincronização, variações súbitas de cargas e curtos-circuitos.

A possibilidade de se traçar as curvas de potência complexa instantânea, calculadas on-line, em tempo real, no barramento transmissor de uma linha de distribuição, abre o horizonte de aplicações da teoria da potência complexa instantânea e dos vetores espaciais instantâneos à monitoração e proteção nos seguintes aspectos adicionais:



- Monitoração do comportamento de sistemas de potência quanto ao fluxo de potência ativa e reativa em regimes permanentes;
- Idem para regimes transitórios (nestes casos as potências ativa e reativa denominam-se respectivamente potência real e imaginária);
- Previsão de estabilidade estática e dinâmica de máquinas síncronas: A configuração do sistema pode ser levantada continuamente através do traçado do diagrama de potência, e portanto, o ponto de limite de estabilidade, representado pelo ponto k do diagrama de círculo de potência, pode ser estimado de forma contínua. Com o início da oscilação da máquina, pode-se traçar a trajetória no diagrama de potência, e calcular a velocidade com que esta se aproxima do ponto k .
- Identificação do tipo de evento (foram estudadas neste trabalho várias condições de oscilação da máquina síncrona e um caso de curto-circuito franco trifásico);

Com relação à proteção, tem-se a possibilidade de se traçar a curva da impedância do sistema e fixar valores mínimos para esta grandeza abaixo do qual um relé digital emite o comando de abertura do disjuntor de proteção da linha. As curvas de variação da potência magnética podem servir como mais um elemento de distinção para que relés de impedância não atuem indevidamente no caso de oscilação de máquinas síncronas sem perda de estabilidade.

Outra grandeza também importante para ser monitorada é a amplitude do vetor espacial instantâneo corrente, pois o seu quadrado é proporcional às perdas no sistema de distribuição e à energia magnética armazenada nos elementos indutivos.



Propõe-se, como sugestão para trabalhos futuros, o aprofundamento do estudo para o desenvolvimento de algoritmos para relés digitais, empregando-se VEIs e as demais variáveis obtidas através destes. Com destaque para o processo de cálculo da potência magnética, a qual encontra-se presente em todo transitório eletromagnético em sistemas de potência.

Relés digitais que incorporem algoritmos com os conceitos aqui estudados poderiam detectar e distinguir os diversos tipos de falhas. Estes relés têm facilidades para incrementar mais funções inteligentes com utilização de redes neurais artificiais, o que representaria um grande avanço tecnológico dos mais representativos para os dias atuais.

Propõem-se, também, a utilização dos diagramas de círculo de potência, corrente e impedância para aquelas finalidades.

Em particular, as variações das indutâncias, resistências e da energia magnética armazenada podem ser comparadas com curvas típicas, possibilitando-se aos operadores de sistema a distinção dos tipos de eventos.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] HASSE, K., "Zur Dynamik drehzahl geregelter Antriebe mit stromrichter gespeisten Asynchron-Kurzschlusslaufermaschinen, Techn. Hochsch". Darmstadt, Dissertation, 1969
- [02] BLASCHKE, F., The principle of field orientation as applied to the new "transvektor" closed-loop control system for rotating-field machines, Siemens Rev., 39 , 5 , May 1972, pp. 217-220
- [03] MILANEZ, D. L., MISKULIN, M. S. "The Instantaneous Complex Power Applied to Three-Phase Machines" – 28IAS (IEEE) Annual Meeting – October 3-8, 1993. Toronto, Canada. Annals, pp. 171-176.
- [04] NABAE, A., TANAKA, T. A new Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Base don Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits. A paper recommended and approved by the IEEE Power System Instrumentation & Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society for presentation at the 1996 IEEE/PES Winter Meeting, January 21-25, 1996, Baltimore, MD.
- [05] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y. AND NABAE, A. (1984). "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage components." IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20m n° 3, May/June-pp.625-630.
- [06] MILANEZ, D. L., "New concepts of the power received by ideal energy storage elements: the instantaneous complex power approach. In: Intenational Symposium on Circuits and Systems, Ames – USA. Anais. IEEE. Ames – USA, 1996, pp. 1038-1041.
- [07] MILANEZ, D. L., "Power Analysis Applying the Instantaneous Complex Power Analytical Expressions on A RL Symmetrical Three-Phase System, In: 40th Midwest. Symposium on Circuits and Systems, IEEE, Sacramento, CA, USA, August 1997, pp 131-134.

- [08] MILANEZ, D. L., "Texto que Sistematiza as Atividades do Docente Apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS/UNESP para a Obtenção do Título de Livre Docente junto ao Departamento de Engenharia Elétrica", Dezembro de 2000, 66pp.
- [09] DE MOURA, R.F., "Uma Introdução à Aplicação de Vetores Espaciais Instantâneos na Monitoração e Proteção de Sistemas Elétricos de Distribuição de Energia Elétrica", dissertação de mestrado, FEIS- UNESP, Julho de 2004, 85 pp.
- [10] STEVENSON, W. D., "Elementos de Análise de Sistema de Potência", trad. e rev. tec. Arlindo Rodrigues Mayer, João Paulo Minussi, Somchai Ansis. 2ª ed. São Paulo. McGraw-Hill, 1986.
- [11] ANDERSON, PAUL M., "Power System control and stability" / Paul M. Anderson, A A Fouad., New York; Iowa State University Press, 1997; IEEE: pc0379-8: IBSN:0-7803-1029-2; 465p.
- [12] XIA, Y. Q.; LI, K.; DAVID, A. K. W. Adaptive Relay Setting for Stand-Alone Digital Distance Protection - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 9, January, 1994.
- [13] GANGADHARAN, G.; ANBALAGAN, P. Microprocessor Based Three Step Quadrilateral Distance Relay for the Protection of EHV/UHV Transmission Lines – Transactions on Power Delivery, Vol. 7 nº 1, January 1992.
- [14] IVANOV-SMOLENSKI, A. V., "Máquinas Elétricas – Máquinas de Corrente Alternada". Trad. RODRÍGUEZ, L., Moscou: Mir Publishes, 1984. Vol.3, 440p. Original Russo.
- [15] BOFFI, L.V., SOBRAL, JR. M. & DANGELO, J. C. "Conversão Eletromecânica de Energia". São Paulo, Edgard Blucher, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1977, 269p.
- [16] NASAR, S. A, 1932. "Máquinas Elétricas" . São Paulo: McGraw-Hill (coleção Schaum) do Brasil, 1984. 218p.

- [17] SLEMON, G. R. Electric Machines, New York: Addison-Wesley published Company, 1982. 578p.
- [18] VENIKOV, R. J., LIEURANCE, D. W., ROGERS, J. D., PURCELL, J.R. AND HASSENZAHL, W.V. "A Transient Processes in Electrical Power System. Trad. UTKIN,, N.. Moscow: Mir Publishers, 1977. 520p. Original Russo.
- [19] MILANEZ, D. L., ESTEVAN, G. P, "Análise de um Retificador Trifásico de Onda Complexa a Tiristor Aplicando a Teoria da Potência Complexa Instantânea"; In: III CONLADIS, USP, São Paulo, Brasil, St. 8 a 10, 1998, pp.419-423.
- [20] WATANABE, E., STEPAHAN R. "Novos Conceitos de Potência Ativa e Reativa em Sistemas Elétricos com Fontes e Cargas Genéricas" – 8º congresso Brasileiro de Automática – UFPA – Belém-PA, pp. TC50 a TC60.
- [21] WATANABE, E. H., STEPHAN, R.M., AREDES, M. New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Power in Electrical System With Generic Loads. A paper recommended and approved by the IEEE Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society for presentation at the IEEE/PES 1992 Winter Meeting, New York, January 23-30, 1992.
- [22] MACINNES, A. D.; MORRISON, I. F. "Real Time Calculation of Resistance and Reactance for Transmission Line Protection by Digital Computer" – Trans. Inst. Eng. Aust. EE7 (1), 16-23, January 1971.



APÊNDICES

Apêndice – A:

Utilização do Diagrama de Círculo na Determinação dos Parâmetros da Máquina Síncrona

Para avaliar as dimensões da aplicabilidade da teoria da potência complexa instantânea nos diagramas de círculo, toma-se como instrumento de prova uma linha de transmissão curta tipo T ou π equivalente relacionando-a com os parâmetros da máquina síncrona modelada no capítulo V, durante o processo transitório como mostra a figura A.1, parâmetros estes, que são lidos através do algoritmo modelado para simulação da própria máquina em forma de diagrama de blocos que originou este presente trabalho. Utiliza-se então como parâmetros, as tensões interna $\dot{V}_S$ e nos terminais da máquina $\dot{V}_R$, considerando-se $\dot{V}_S = \dot{V}_R$.

$$\dot{V}_R = \dot{V}_S = \frac{20.000}{\sqrt{2}} = 14.142,14 V$$

que são os valores médios das tensões $\dot{V}_S$ e $\dot{V}_R$.

E da teoria dos diagramas de círculo, para este modelo de circuito, temos as constantes generalizadas estabelecidas pela teoria dos diagramas de círculo [10] assim representadas pelas equações:

$$A = 1 \qquad B = Z \qquad C = 0 \qquad D = 1$$



como, $D = 1 \angle 0^\circ$ e mantendo $L = 22 \text{ mH}$ que é a indutância considerada para este circuito e sendo:

$$Z = XL \quad B = XL \angle \beta \quad \beta = 90^\circ$$

$$B = Z = X L \angle 90^\circ,$$

portanto, determina-se a constante generalizada B que é a relação entre tensão na barra geradora e corrente na barra receptora:

$$B = 2\pi fL = 2\pi \cdot 60 \cdot 22 \cdot 10^{-3} = 8,29 \Omega$$

como é conhecido o valor dos ângulos $\beta = 90^\circ$ e $\Delta = 1,7^\circ$ mostrados na figura A.1, este último que é o ângulo formado pela linha de referência de equação $\frac{|\dot{V}_s|^2}{|B|}$ e a linha que

representa a potência reativa que é a equação $\frac{|D| \cdot |\dot{V}_s|^2}{|B|}$. Com todas as grandezas equacionáveis conhecidas, determina-se o ponto n , como segue:

$$P = + \frac{|D|}{|B|} \cdot |\dot{V}_s|^2 \cos (\beta - \Delta)$$

$$P = + \frac{|1|}{|8,29|} \cdot |14.142,14|^2 \cos (90^\circ - 1,7^\circ) \Rightarrow P = 0,72 \text{ MW}$$

que é a potência ativa por fase. E para as três fases do circuito têm-se,

$$P = 3 \times 0,74 MW \Rightarrow P \cong 2,14 MW$$

$$Q = + \frac{|D|}{|B|} \cdot |\dot{V}_s|^2 \cdot \sin(\beta - \Delta)$$

$$Q = + \frac{|1|}{|8,29|} \cdot |14.142,14|^2 \cdot \sin(90^\circ - 1,7^\circ) \Rightarrow Q = 24,12 MVAr$$

que é a potência reativa por fase e, da mesma forma para potência ativa, calcula-se a potência reativa para as três fases,

$$Q = 3 \times 24,12 MVAr \Rightarrow Q \cong 72,3 MVAr$$

Então, encontra-se o ponto $n(P, Q)$ do gráfico da figura A.1 cujas coordenadas P e Q representam respectivamente as potências ativa e reativa.

$$n(0,2 MW ; 7,23 MVAr) .$$

A teoria permite ainda, determinar o raio R , do círculo da barra geradora o qual representa a potência aparente do circuito, e para isso é fornecida a equação do raio,

$$R = \frac{|\dot{V}_s| \cdot |\dot{V}_R|}{|B|},$$

então, calcula-se R ,

$$R = \frac{|14.142,14| \cdot |14.142,14|}{|8,29|} = 24,13 MVA$$

Como, este raio representa uma forma de potência, o valor 24,13 MVA representa a potência por fase e, do mesmo modo que considerado para P e Q , considera-se para o raio R que é exatamente a potencia aparente N .

Logo,

$$R = N = 3 \times 24,13 \text{ MVA} \Rightarrow R = N \cong 72,4 \text{ MVA}$$

A curva característica da potência Complexa Instantânea para este modelo de carga, durante o processo transitório eletromecânico, é o lugar geométrico que determina a combinação entre as coordenadas do centro do círculo, $n(P, Q)$ e os ângulos de potência δ a cada interseção tripla - ponto do círculo, ponto da curva de transitório eletromecânico e a reta que os unem ao ponto n .

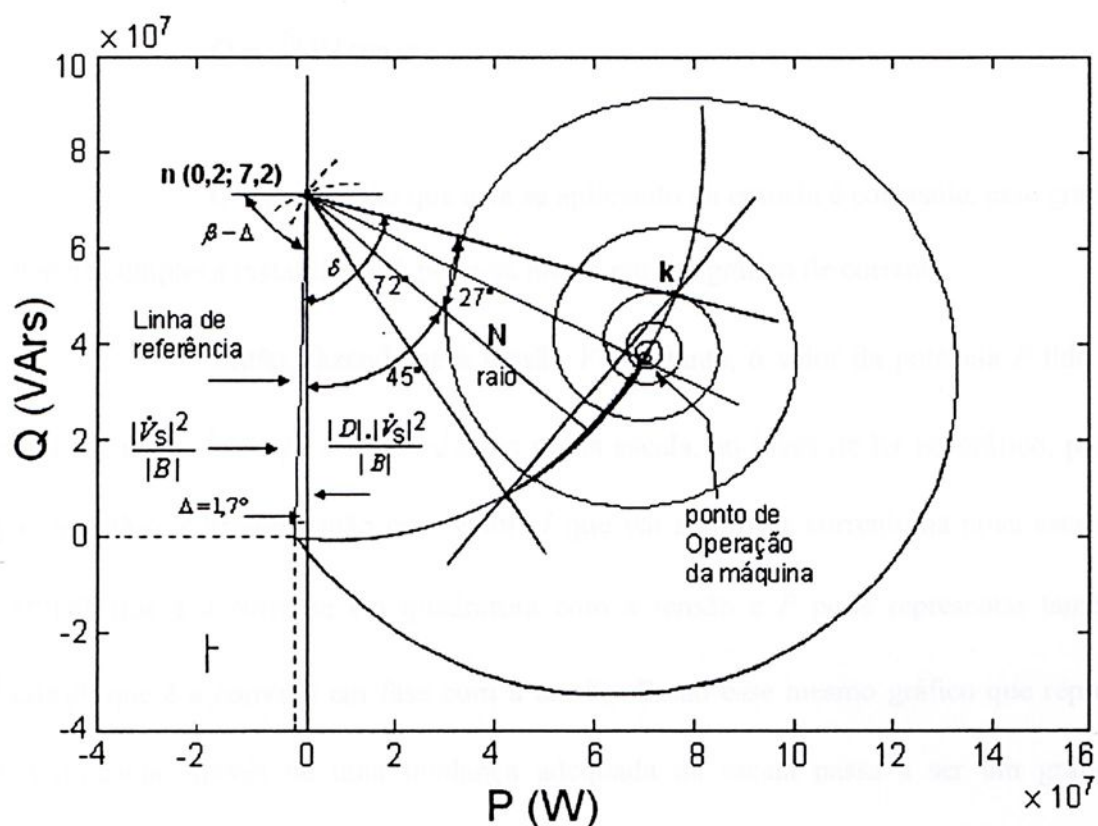


Figura A.1 - Diagrama de Círculo representativo da Potência Complexa Instantânea para uma Máquina Síncrona durante a Sincronização.

Apêndice – B:

Obtenção do Diagrama de Círculo para Corrente

Um outro fator que pode ser útil é que se existe um gráfico de potência na figura V.23, pode-se mudar sua escala, transformando-o em um gráfico de tensão e corrente como na figura B.1 de acordo com as equações abaixo.

$$S = \sqrt{3} V I, \quad \text{sendo: } I = \frac{S}{\sqrt{3} V}, \quad \text{têm-se:}$$

$$P = \sqrt{3} V I \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3} V I \sin \varphi$$

Como a tensão que está se aplicando na entrada é constante, esse gráfico de potência complexa instantânea S , pode-se tornar em um gráfico de corrente.

Então, fazendo-se a tensão V constante, o valor da potência P lido nessa escala vai ser o $I \cos \varphi$ e $S/V\sqrt{3}$ na nossa escala, ao invés de ler no gráfico, potência aparente, lê-se corrente, então esse valor I que vai significar corrente na nova escala e, o $I \sin \varphi$ que é a corrente em quadratura com a tensão e P pode representar também o $I \cos \varphi$ que é a corrente em fase com a tensão. Então esse mesmo gráfico que representa uma potência através de uma mudança adequada da escala passa a ser um gráfico de corrente. Se tomar a tensão aqui no eixo de tensão o gráfico fica exatamente o gráfico da corrente em relação a tensão, a corrente começa do 0 (zero) e em seguida vai percorrendo

essa curva e vai tendo uma corrente atrasada de mais de 90° em relação a tensão, isto significa que há efeito capacitivo no sistema. Uma outra utilidade do gráfico é a determinação do fator de potência, como varia em particular nesse instante. Um outro fato que deve ser observado, é que durante o transitório eletromagnético, nesses três círculos, há uma grande variação de potência reativa e depois vai se atenuando, embora tenha grande variação de potência ativa, predomina a potência reativa. Essa grande variação da potência ativa é devido a uma parte dessa potência ativa que vai armazenar energia no campo do estator da máquina (no enrolamento do estator), uma parte dessa potência ativa durante o transitório eletromagnético (três ciclos) é a energia que vai para o estator da máquina. Quando a máquina entra no regime transitório eletromecânico, nota-se que a oscilação da potência reativa é menor, mas, a variação da potência mecânica continua sendo grande, na pequena variação (proporcionalmente) da energia magnética após o transitório da máquina.

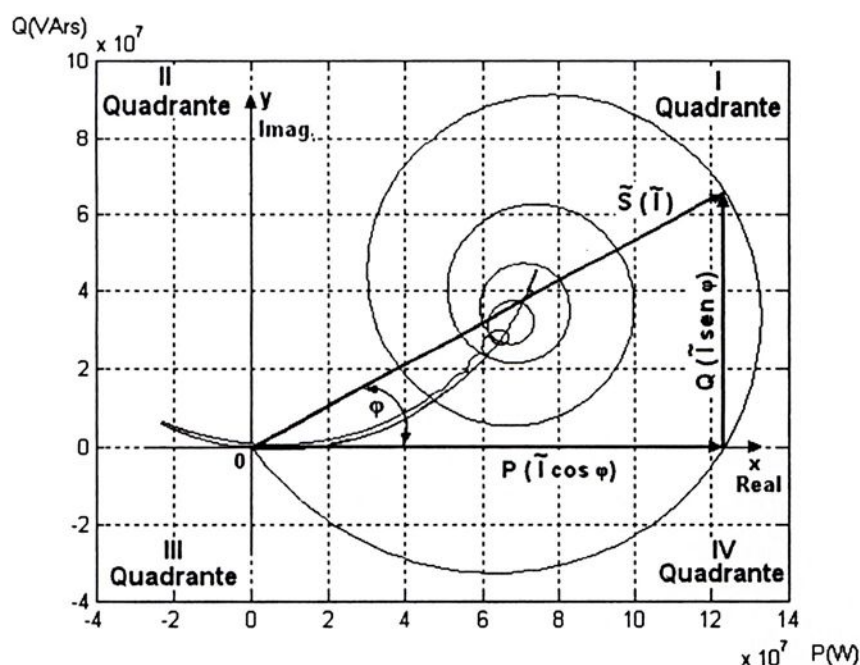


Figura B.1 - Transformação das coordenadas de potência em corrente na variação da Potência complexa instantânea.



unesp

**,UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

Câmpus de Ilha Solteira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Av. Brasil Centro, 56

15385-000 Ilha Solteira - SP

www.dee.feis.unesp.br



unesp