

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Jorge Leonidas Lafitte Vega

**Avaliação das Condições de Segurança de
Tensão na Presença de Motores de Indução
e Capacitores Chaveáveis**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Ricardo Bernardo Prada

Rio de Janeiro, março de 2005



Jorge Leonidas Lafitte Vega

**Avaliação das Condições de Segurança de
Tensão na Presença de Motores de Indução
e Capacitores Chaveáveis**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Ricardo Bernardo Prada
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. Jorge Luiz de Araújo Jardim
ONS

Prof. Júlio César Rezende Ferraz
CEPEL

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de março de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Jorge Leonidas Lafitte Vega

Graduou-se em Engenharia Mecânica-Elétrica na UNI (Universidad Nacional de Ingeniería - Lima, Perú) em 2002. Dedicado a tempo integral à pesquisa em Sistemas de Energia Elétrica na PUC-Rio, Brasil.

Ficha catalográfica

Vega, Jorge Leonidas Lafitte

Avaliação das condições de segurança de tensão na presença de motores de indução e capacitores chaveáveis / Jorge Leonidas Lafitte Vega ; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

126 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Segurança de tensão. 3. Estabilidade de tensão. 4. Colapso de tensão. 5. Motor de indução. 6. Capacitor chaveável. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha querida mãe, Regina Vega Reyna
pelo amor, apoio e confiança.

Agradecimentos

A Deus.

A minha mãe Regina Vega Reyna, por seus bons conselhos, infinito amor, apoio econômico e por estar sempre a meu lado, sem ela seria impossível terminar o mestrado.

A meu pai Jorge Lafitte Roldán, por me cuidar e me guiar nesta vida, sua presença física não está mais comigo mas sua presença espiritual é suficiente para seguir adiante.

Muito especialmente, agradeço ao meu orientador Ricardo Bernardo Prada pelo permanente apoio nas diferentes etapas do desenvolvimento nesta dissertação, por sua atenção e paciência na discussão dos diferentes aspectos relacionados ao tema de pesquisa.

Agradeço, também a meus co-orientadores: Luis Cláudio Ferreira (ONS), João Passos Filho e Ricardo Henriques (CEPEL) pelas inestimáveis colaborações para o desenvolvimento da tese.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À Gabriela pelo amor e amizade.

A todos os amigos do curso de Pós - Graduação em Engenharia Elétrica, muito especialmente ao Leonardo Xavier da Silva e ao Jefferson Silveira.

Resumo

Vega, Jorge Leonidas Lafitte. **Avaliação das Condições de Segurança de Tensão na Presença de Motores de Indução e Capacitores Chaveáveis**. Rio de Janeiro, 2005. 126p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Após a incidência de inúmeros colapsos ocorridos nos sistemas de transmissão de energia devido ao uso extremo das linhas de transmissão, a estabilidade, ou mais adequadamente, a segurança de tensão tornou-se um assunto importante os últimos anos. A correta representação de cargas e de dispositivos de controle de tensão é cada vez mais importante na análise de segurança de tensão do sistema elétrico, em função da sua complexidade crescente e da necessidade de ações operativas mais precisas. A avaliação das condições de segurança de tensão é realizada com base em um modelo linearizado das equações de fluxo de carga, incluindo toda e qualquer equação de controle, e os índices resultantes são calculados a partir de um determinado ponto de operação. Em estudos *off-line*, este ponto é usualmente proveniente do resultado de um problema de fluxo de carga. É importante que os modelos matemáticos do sistema e seus componentes, de controles e de limites sejam compatíveis nos dois programas computacionais. Estuda-se neste trabalho a modelagem em regime permanente, e a incorporação à função de avaliação da segurança de tensão, de cargas do tipo motor de indução e do controle de tensão por faixa através de capacitores chaveáveis. Aspectos fundamentais da presença de motores de indução e capacitores chaveáveis na avaliação da segurança de tensão são apresentados e discutidos. São mostrados exemplos numéricos de avaliação dos índices de estabilidade de tensão que ilustram a necessidade de uma modelagem realista.

Palavras - chave

Segurança de tensão, estabilidade de tensão, colapso de tensão, motor de indução, capacitor chaveável.

Abstract

Vega, Jorge Leonidas Lafitte. **Voltage Security Assessment in the Presence of Induction Motors and Switchable Capacitors**. Rio de Janeiro, 2005. 126p. Master Dissertation - Electrical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

After the incidence of innumerable collapses occurred in the energy transmission systems due to the extreme use of the transmission lines, the voltage stability, or more adequately, the voltage security became an important issue in the last years. The correct representation of loads and voltage control devices is important in the analysis of voltage security of the electrical system, due to its increasing complexity and to the necessity of more accurate and secure operative actions. The voltage security assessment is based on a linear model of the load flow equations, including all and any control equation, and the resulting indexes are calculated for a specified operating point. In off-line studies the operating point is usually obtained from a load flow algorithm. It is important that the system and its components mathematical models, control devices and limits are compatible in both computational programs. This work is concerned with the steady state modelling and its incorporation into the voltage security assessment function, of induction motor type loads and band voltage control by switchable capacitors. Fundamental aspects of induction motors and switchable capacitors in the assessment of voltage security are presented and discussed. Numerical examples of voltage stability assessment indexes are presented to illustrate the necessity of realistic modelling.

Key-Words

Voltage security, voltage stability, voltage collapse, inductor motor, switchable capacitor.

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Considerações Gerais	19
1.2	Objetivo	19
1.3	Estrutura da Dissertação	20
2	Estabilidade de Tensão	21
2.1	O Limite de Estabilidade de Tensão (LET)	21
2.1.1	Curvas P, Q e ϕ Constantes.....	25
2.2	A Existência de uma Máxima Potência Transmitida	29
2.2.1	Por Que a Potência Consumida Passa a Diminuir	31
2.3	A Introdução de um Capacitor Pode Diminuir a Tensão.....	34
2.4	Saturação da Elevação da Tensão com a Introdução de Muitos Capacitores	39
2.5	Índices de Avaliação das Condições de Segurança de Tensão.....	42
2.5.1	Magnitude do Determinante da Matriz [D'].....	44
2.5.1.1	Sistema Duas Barras.....	44
2.5.1.2	Sistema Multi-Nó	45
2.5.2	Sinal do Determinante da Matriz [D'].....	47
2.5.3	Margem de Potência	49
3	Motor de Indução	51
3.1	Introdução	51
3.2	Fundamento Teórico do Motor de Indução	51
3.2.1	Princípio de Funcionamento.....	51
3.2.2	Comparação entre a Ação Motora e a Ação Geradora	53
3.2.3	Escorregamento do Rotor	54
3.2.4	Freqüência Elétrica no Rotor.....	55
3.2.5	Característica Torque versus Velocidade	56
3.2.6	Curva Torque Elétrico versus Escorregamento	59
3.2.7	Parâmetros dos Principais Motores de Indução Típicos.....	60

3.3	Modelagem para Motores de Indução.....	61
3.3.1	Equações Básicas	61
3.3.2	Modelo Clássico Equivalente de Regime Permanente.....	62
3.3.3	Modelo Equivalente em Regime Permanente Considerando os Transitórios no Rotor	63
3.3.4	Dedução da Equação do Torque Induzido.....	68
3.3.4.1	Sem Capacitor na Barra Terminal.....	69
3.3.4.2	Com Capacitor na Barra Terminal.....	71
3.3.5	Motores em Paralelo	73
3.4	Implementação Computacional	75
3.4.1	Cálculo da Potência Injetada e das Matrizes A, B, C, D.....	75
3.5	Resultados	76
3.5.1	Exemplo Numérico	76
3.5.2	Características Principais do Motor de Indução.....	77
3.5.3	Índices Avaliados na Barra Terminal do Motor de Indução	82
3.5.4	Índices Avaliados na Barra Terminal do Motor de Indução Modelado como Injeção de Potência Consumida.....	85
3.5.5	Índices Avaliados na Barra Terminal do Motor de Indução com Capacitor	86
3.5.6	Índices Avaliados na Barra Terminal do Motor de Indução com Capacitor Modelado como Injeção de Potência Consumida	89
3.5.7	Índices Avaliados com Motores de Indução em Paralelo	90
3.6	Conclusões do Capítulo.....	95
4	Chaveamento Automático de Banco de Capacitores.....	97
4.1	Introdução	97
4.2	Modelo Matemático	97
4.3	Implementação Computacional	100
4.3.1	Cálculo da Potência Injetada e das Matrizes A, B, C, D.....	100
4.4	Resultados	102
4.4.1	Sistema do Exemplo.....	102
4.4.2	Chaveamento dos Capacitores	103
4.4.3	Índices Avaliados.....	104

4.4.4	Índice Susceptância versus Tensão Controlada.....	107
4.4.5	Exemplo Numérico	108
4.4.6	Efeito da Remoção de Capacitores.....	111
4.5	Conclusões do Capítulo.....	114
5	Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros	116
6	Referências Bibliográficas	119
	Apêndice A - O Limite Estático de Estabilidade Angular (LEA).....	121
	Apêndice B - Sobre a Simultaneidade de $\det[D']=0$ nas Barras Terminal e Interna de Um Motor de Indução.....	123
B.1	Primeiro Teste	123
B.2	Segundo Teste	124
B.3	Terceiro Teste	124
B.4	Quarto Teste	125

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Pontos de Operação $\partial P/\partial\theta=0$	30
Tabela 2.2 - Variações de Tensão e Corrente na Barra de Carga.....	33
Tabela 2.3 - Pontos de Operação para Avaliar o Aumento ou Decréscimo da Tensão com a Introdução de um Capacitor	37
Tabela 2.4 - Pontos de Operação para Avaliar a Saturação da Elevação da Tensão	41
Tabela 3.1 - Parâmetros dos Motores de Indução Típicos	60
Tabela 3.2 - Grandezas Elétricas e Índices de Estabilidade de Tensão na Barra Terminal.....	83
Tabela 3.3 - Componentes dos Gradientes da Matriz [D'] na Barra Terminal no Entorno da Descontinuidade do $\det[D']$	84
Tabela 3.4 - Ponto de Operação Correspondente ao Máximo Carregamento para os Dois Modelos de Motor de Indução.....	85
Tabela 3.5 - Índices de Estabilidade de Tensão na Barra Interna com e sem Capacitor	88
Tabela 3.6 - Índices de Estabilidade de Tensão na Barra Terminal com e sem Capacitor	89
Tabela 3.7 - Ponto de Operação Correspondente ao Máximo Carregamento para os Dois Modelos de Motor de Indução com Capacitor.....	90
Tabela 3.8 - Índices de Estabilidade de Tensão na Barra Terminal Considerando Um e Dois Motores em Paralelo.....	92
Tabela 3.9 - Índices na Barra Interna Considerando Um e Dois Motores em Paralelo...	93
Tabela 3.10 - Índices de Estabilidade de Tensão na Barra Terminal Avaliado em Condições Nominais para os Motores de Indução em Paralelo.....	95
Tabela 4.1 - Índices de Estabilidade de Tensão Avaliados na Barra 2.....	106
Tabela 4.2 - Pontos de Operação da Região Normal de Operação Antes e Depois da Conexão de um Capacitor	109
Tabela 4.3 - Pontos de Operação da Região Anormal de Operação Antes e Depois da Conexão de um Capacitor	110
Tabela 4.4 - Índices de Estabilidade de Tensão Considerando a Remoção de Capacitores.	112

Tabela B.1 - O $\det[D']$ do Primeiro Teste	123
Tabela B.2 - O $\det[D']$ do Segundo Teste	124
Tabela B.3 - O $\det[D']$ do Terceiro Teste	125
Tabela B.4 - O $\det[D']$ do Quarto Teste.....	126

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Circuito de Duas Barras para Deduzir o Limite de Estabilidade de Tensão.....	22
Figura 2.2 - Sistema de Duas Barras sem Capacitor na Barra Terminal	26
Figura 2.3 - Sistema de Duas Barras com Capacitor na Barra Terminal	27
Figura 2.4 - Curvas para P Constante no Plano Defasagem Angular Θ_1 versus Tensão V_1	29
Figura 2.5 - Circuito sem Capacitor.....	35
Figura 2.6 - Circuito com Capacitor.....	35
Figura 2.7 - Aumento e Diminuição da Tensão Respectivamente na Região Superior e Inferior da Curva com a Introdução de um Capacitor	35
Figura 2.8 - Diminuição da Tensão na Região Inferior da Curva com a Introdução de um Capacitor	36
Figura 2.9 - Efeito da Introdução de Muitos Capacitores sobre a Tensão	39
Figura 2.10 - Curvas para ϕ Constante e para P Constante	40
Figura 2.11 - Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano $V_x\Theta$	49
Figura 2.12 - Sinal da Margem na Curva V_xS	50
Figura 3.1 - Princípio do Motor de Indução	52
Figura 3.2 - Motor Elementar	53
Figura 3.3 - Gerador Elementar	53
Figura 3.4 - Circuito Motor	53
Figura 3.5 - Circuito Gerador.....	53
Figura 3.6 - Campos Magnéticos em Um Motor de Indução com carga Leve	58
Figura 3.7 - Campos Magnéticos em Um Motor de Indução com Carga Pesada.....	58
Figura 3.8 - Característica Torque versus Escorregamento.....	60
Figura 3.9 - Circuito Clássico Equivalente de Regime Permanente do Motor de Indução.....	63
Figura 3.10 - Circuito Equivalente Transitório para o Motor de Indução	66
Figura 3.11 - Circuito Equivalente do Motor de Indução em Regime Permanente Considerando os Transitórios no Rotor.....	68
Figura 3.12 - Equivalente <i>Thevenin</i> do Motor de Indução sem Capacitor na Barra Terminal.....	69
Figura 3.13 - Diagrama de Fluxo de Potência no Motor de Indução.....	70

Figura 3.14 - Equivalente <i>Thevenin</i> do Motor de Indução com Capacitor na Barra Terminal.....	72
Figura 3.15 - Alternativa do Circuito Clássico Equivalente do Motor de Indução.....	73
Figura 3.16 - Agrupando os Modelos dos Motores de Indução em Paralelo	74
Figura 3.17 - Circuito Equivalente dos Motores de Indução em Paralelo	74
Figura 3.18 - Circuito Equivalente do Motor de Indução com Transitórios no Rotor Unido a Uma Linha de Transmissão	77
Figura 3.19 - Curva Torque Elétrico versus Escorregamento	77
Figura 3.20 - Curva Potência Mecânica versus Escorregamento	78
Figura 3.21 - Corrente do Rotor versus Escorregamento	79
Figura 3.22 - Corrente de Linha versus Escorregamento	80
Figura 3.23 - Curva do Fator de Potência versus Potência Elétrica Consumida pelo Motor de Indução.....	80
Figura 3.24 - Potência Reativa versus Tensão na Barra Terminal	81
Figura 3.25 - Tensão nas Barras 1 e 2 versus Potência no Entreferro	82
Figura 3.26 - O $\det[D']$ na Barra 2 versus Potência no Entreferro	83
Figura 3.27 - O $\det[D']$ na Barra 1 versus Potência Elétrica Consumida na Barra Terminal.....	84
Figura 3.28 - Curvas Tensão na Barra Terminal versus Potência Elétrica Consumida para os Dois Modelos de Motor de Indução.....	85
Figura 3.29 - Potência Elétrica Consumida, Potência no Entreferro e Perdas no Estator do Motor de Indução versus Escorregamento	86
Figura 3.30 - Circuito Equivalente do Motor de Indução com Transitórios no Rotor e Capacitor na Barra Terminal Unido a Uma Linha de Transmissão	87
Figura 3.31 - Curvas Tensão versus Potência no Entreferro na Barra 2 com e sem Capacitor	87
Figura 3.32 - Curvas Tensão versus Potência Elétrica na Barra 1 com e Sem Capacitor	88
Figura 3.33 - Curvas Tensão na Barra Terminal versus Potência Elétrica Consumida para os Dois Modelos de Motor de Indução com Capacitor.....	90
Figura 3.34 - N Motores de Indução Tipo 4 em Paralelo.....	91
Figura 3.35 - Curvas Tensão na Barra 1 versus Potência Elétrica com Um e Dois Motores em Paralelo	91
Figura 3.36 - Curvas Tensão na Barra Interna versus Potência no Entreferro com Um e Dois Motores em Paralelo.....	92

Figura 3.37 - Análise do Máximo Número de Motores de Indução a Serem Conectados em Paralelo	93
Figura 3.38 - Curva da Potência Nominal Equivalente Sobre as Curvas da Potência Elétrica Equivalente dos Motores de Indução em Paralelo	94
Figura 4.1 - Barra com Controle de Tensão em um Valor Fixo.....	102
Figura 4.2 - Sistema de 3 Barras com Chaveamento de Capacitores na Barra 2	102
Figura 4.3 - Perfil de Tensão na Barra 2 com Compensação com Bancos de 8 MVar	103
Figura 4.4 - Faixa Normal de Operação na Barra 2	105
Figura 4.5 - Detalhe da Curva PxV com Treze Capacitores Conectados	105
Figura 4.6 - Atuação do Controle de Tensão	109
Figura 4.7 - Efeito da Remoção de Capacitores	111
Figura 4.8 - Limite até Onde se Pode Retirar Capacitores	113
Figura 4.9 - O Controle de Tensão Não Atinge mais à Tensão Esperada $V_{esp}=1$ pu....	113
Figura B.1 - Curvas $V_1 \times P_2$ e $V_2 \times P_2$ do Primeiro Teste.....	123
Figura B.2 - Curvas $V_1 \times P_2$ e $V_2 \times P_2$ do Segundo Teste.....	124
Figura B.3 - Curvas $V_1 \times P_2$ e $V_2 \times P_2$ do Terceiro Teste.....	125
Figura B.4 - Curvas $V_1 \times P_2$ e $V_2 \times P_2$ do Quarto Teste	126

Abreviaturas e Siglas

\tilde{E}'	Tensão transitória eficaz complexa atrás da impedância transitória referida aos eixos d-q
E'_d	Tensão transitória eficaz referida ao eixo d
e'_d	Tensão transitória instantânea referida ao eixo d
E'_q	Tensão transitória eficaz referida ao eixo q
e'_q	Tensão transitória instantânea referida ao eixo q
H	Constante de tempo de inércia do rotor
I_{dr}	Componente da corrente eficaz do rotor referido ao eixo d
i_{dr}	Componente da corrente instantânea do rotor referido ao eixo d
I_{ds}	Componente da corrente eficaz do estator referido ao eixo d
i_{ds}	Componente da corrente instantânea do estator referido ao eixo d
I_{qr}	Componente da corrente eficaz do rotor referido ao eixo q
i_{qr}	Componente da corrente instantânea do rotor referido ao eixo q
I_{qs}	Componente da corrente eficaz do estator referido ao eixo q
i_{qs}	Componente da corrente instantânea do estator referido ao eixo q
\tilde{I}_r	Corrente eficaz complexa do rotor referida aos eixos d-q
\tilde{I}_s	Corrente eficaz complexa do estator referida aos eixos d-q
L_m	Indutância mútua entre o estator e o rotor
L_r	Indutância de dispersão do rotor
L_{rr}	Indutância própria do rotor
L_s	Indutância de dispersão do estator
L_{ss}	Indutância própria do estator
L'_{ss}	Indutância transitória do motor de indução
P_{mec}	Potência mecânica desenvolvida no eixo do motor de indução
R_r, r_r	Resistência do rotor
R_s, r_s	Resistência do estator
T'_o	Constante de tempo transitória de circuito aberto do motor de indução
V_{dr}	Componente de tensão eficaz do rotor referida ao eixo d
v_{dr}	Componente de tensão instantânea do rotor referida ao eixo d
V_{ds}	Componente de tensão eficaz do estator referida ao eixo d

V_{ds}	Componente de tensão instantânea do estator referida ao eixo d
V_{qr}	Componente de tensão eficaz do rotor referida ao eixo q
v_{qr}	Componente de tensão instantânea do rotor referida ao eixo q
V_{qs}	Componente de tensão eficaz do estator referida ao eixo q
v_{qs}	Componente de tensão instantânea do estator referida ao eixo q
\tilde{V}_r	Tensão eficaz complexa do rotor referida aos eixos d-q
\tilde{V}_s	Tensão eficaz complexa do estator referida aos eixos d-q
X	Reatância de circuito aberto do rotor da máquina de indução
X_m	Reatância mútua entre o estator e rotor
X_r	Reatância de dispersão do rotor
X_s	Reatância de dispersão do estator
X'_s	Reatância transitória do motor de indução
Y	Admitância <i>shunt</i> da barra interna do circuito equivalente do motor
Z	Impedância serie do circuito equivalente do motor
λ_{dr}	Componente do fluxo enlaçado pelo rotor referido ao eixo d
λ'_{dr}	Componente transitório do fluxo enlaçado pelo rotor referido ao eixo d
λ_{ds}	Componente do fluxo enlaçado pelo estator referido ao eixo d
λ_{qr}	Componente do fluxo enlaçado pelo rotor referido ao eixo q
λ'_{qr}	Componente transitória do fluxo enlaçado pelo rotor referido ao eixo q
λ_{qs}	Componente do fluxo enlaçado pelo estator referido ao eixo q
P_{SCL}	Perdas no cobre do estator
P_{RCL}	Perdas no cobre do rotor
$P_{núcleo}$	Perdas no núcleo
$P_{diversas}$	Perdas por atrito próprio e com o ar, entre outras
P_{AG}	Potência entreferro
P_{CONV}	Potência convertida
P_{el}	Potência elétrica de entrada ao motor de indução
w_s	Velocidade síncrona da máquina em rad/s (Magnitude BASE)
w_m	Velocidade mecânica do motor em rad/s
w'_s	Velocidade síncrona da máquina em pu
w'_m	Velocidade mecânica do motor em pu
τ_{ind}	Torque induzido da máquina
$\cos \phi$	Fator de potência da carga do motor de indução

Z_{TH}	Impedância <i>Thevenin</i> equivalente sem capacitor na barra terminal
θ_{TH}	Ângulo <i>Thevenin</i> equivalente sem capacitor na barra terminal
R_{TH}	Resistência <i>Thevenin</i> equivalente sem capacitor na barra terminal
X_{TH}	Reatância <i>Thevenin</i> equivalente sem capacitor na barra terminal
V_{TH}	Tensão <i>Thevenin</i> equivalente sem capacitor na barra terminal
s	Escorregamento da máquina
R_E	Resistência equivalente do rotor
R_L	Resistência da linha
X_L	Reatância da linha
R_{THc}	Reatância <i>Thevenin</i> equivalente com capacitor na barra terminal
X_{THc}	Reatância <i>Thevenin</i> equivalente com capacitor na barra terminal
V_{THc}	Tensão <i>Thevenin</i> equivalente com capacitor na barra terminal
θ_{THc}	Ângulo <i>Thevenin</i> equivalente com capacitor na barra terminal
X_{r0}	Reatância de dispersão a rotor bloqueado
B_R	Campo magnético do rotor
θ_R	Ângulo do fator de potência do rotor
E_R	Tensão do rotor
B_{net}	Campo magnético resultante do motor
I_M	Corrente de magnetização
I_R	Corrente no rotor
δ	Ângulo entre os campos magnéticos resultante e rotor
PF_R	Fator de potência resultante no rotor
LET	Limite de estabilidade de tensão
LEA	Limite estático de estabilidade angular
Z_t	Impedância da linha de transmissão
α_t	Ângulo da impedância da linha de transmissão
Z_c	Impedância de carga
T_e	Torque elétrico
T_m	Torque mecânico
N	Número de motores de indução
PN	Potência nominal do motor de indução
M	Motor de indução