

Cleber Roberto Guirelli
Ivanilda Matile

Transmissão de energia elétrica

Teoria e prática
em linhas aéreas

Transmissão de energia elétrica

Teoria e prática
em linhas aéreas



7

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

Reitor: Benedito Guimarães Aguiar Neto

Vice-reitor: Marcel Mendes

COORDENADORIA DE PUBLICAÇÕES ACADÊMICAS

Coordenadora: Helena Bonito Pereira

EDITORA DA UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

Conselho Editorial

Helena Bonito Pereira (*Presidente*)

José Francisco Siqueira Neto

Leila Figueiredo de Miranda

Luciano Silva

Maria Cristina Triguero Veloz Teixeira

Maria Lucia Marcondes Carvalho Vasconcelos

Moises Ari Zilber

Valter Luís Caldana Júnior

Wilson do Amaral Filho

COLEÇÃO CONEXÃO INICIAL

Diretora: Maria Lucia Marcondes Carvalho Vasconcelos

Cleber Roberto Guirelli
Ivanilda Matile

Transmissão de energia elétrica

Teoria e prática
em linhas aéreas

© 2014 Cleber Roberto Guirelli e Ivanilda Matile

Todos os direitos reservados à Editora Mackenzie.
Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida por qualquer meio ou forma sem a prévia autorização da Editora Mackenzie.

Coordenação editorial: Andréia Ferreira Cominetti
Capa e projeto gráfico: O Capista
Produção editorial: Crayon Editorial

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Guirelli, Cleber Roberto

Transmissão de energia elétrica : teoria e prática em linhas aéreas / Cleber Roberto Guirelli e Ivanilda Matile. -- 1. ed. -- São Paulo : Editora Mackenzie, 2014. -- (Coleção conexão inicial ; 7)

Bibliografia.

ISBN: 978-85-8293-029-8

1. Energia elétrica - Transmissão 2. Engenharia elétrica 3. Linhas elétricas aéreas I. Matile, Ivanilda. II. Título. III. Série.

14-01721

CDD-621.31922

Índice para catálogo sistemático:

1. Linhas aéreas de transmissão de energia elétrica :
Engenharia elétrica 621.31922

EDITORA MACKENZIE
Rua da Consolação, 930
Edifício João Calvino
São Paulo – SP – CEP: 01302-907
Tel.: (5511) 2114-8774
editora@mackenzie.br
www.mackenzie.br/editora.html

Como adquirir o livro:
Livraria Mackenzie
Tel.: (5511) 2766-7027
livraria@mackenzie.br

Livraria virtual
www.livraria.mackenzie.br

SUMÁRIO

Lista de ilustrações	7
Lista de símbolos e notações	11
Apresentação	15
1 Ondas viajantes em linhas de transmissão de energia	17
Análise matemática da linha de transmissão	17
Equações da LT no domínio da frequência	26
Exemplos resolvidos	41
Exercícios propostos	51
2 Análise das LT no domínio do tempo	55
Diagrama de treliças	57
Potência transferida	61
Problemas resolvidos	63
Problemas propostos	75
3 Modelos de linhas de transmissão	77
Representação das linhas de transmissão como quadripolos	77
Modelos de parâmetros concentrados em função do comprimento	79
Fluxo de potência em um quadripolo	86
Exercícios resolvidos	90
Exercícios propostos	101

4	Parâmetros elétricos das linhas de transmissão	105
	Dimensionamento da resistência série	106
	Dimensionamento da indutância série	110
	Dimensionamento da capacitância paralela	115
	Problemas resolvidos	119
	Problemas propostos	132
5	Linhas de transmissão em regime permanente	137
	Carga nas linhas	137
	Compensação reativa das linhas	141
	Linha de meia onda	147
	Problemas resolvidos	148
	Problemas propostos	166
	Referências	169
	Bibliografia comentada	171
	Índice	173

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Circuito 1.1	Circuito típico de aplicação da linha de transmissão	18
Circuito 1.2	Linha de transmissão dividida em trechos de comprimento dx	19
Circuito 1.3	Modelos exemplos de um circuito equivalente tipo T (a), em L (b) e em π (c) de um elemento diferencial dx de linha de transmissão	20
Circuito 1.4	Circuitos equivalentes tipo T (a), L (b) e π (c) com impedâncias em série e admitâncias em paralelo	21
Circuito 1.5	Circuito para análise de Kirchhoff	22
Circuito 1.6	Linha alimentada por tensão senoidal	26
Circuito 1.7	Referência da posição arbitrária no ponto x para o cálculo das tensões	33
Circuito 1.8	Condições de contorno na carga	34
Circuito 1.9	Condições de contorno na entrada da LT	35
Circuito 1.10	Trechos de uma LT homogênea e as tensões incidentes e refletidas	35
Circuito 1.11	Entrada da LT conectada ao gerador	37
Circuito 1.12	Referência da posição arbitrária da LT no ponto x	38
Circuito 1.13	Representação de uma LT infinita	40
Circuito 1.14	Circuito do Exemplo 1.1: Linha infinita alimentada com bateria	41
Circuito 2.1	Descontinuidade no final da linha	55
Circuito 2.2	Transitório na linha de transmissão	58
Circuito 2.3	Circuito do Exemplo 2.1: Linha terminada em curto-circuito	63
Circuito 2.4	Circuito do Exemplo 2.2: Linha terminada em vazio ou circuito aberto	67
Circuito 2.5	Circuito do Exemplo 2.3: Linha com terminação capacitiva	69
Circuito 3.1	Circuito elétrico para linha curta	80

Circuito 3.2	Circuito π representativo de uma linha de transmissão média	82
Circuito 3.3	Circuito T representativo de uma linha de transmissão média	83
Circuito 3.4	Circuito π representativo de uma linha de transmissão longa	85
Circuito 3.5	Circuito do Exemplo 3.1a	90
Circuito 3.6	Circuito do Exemplo 3.1b	91
Circuito 3.7	Circuito do Exemplo 3.1c	92
Circuito 4.1	Modelo de uma linha de transmissão	105
Circuito 5.1	Linha de transmissão com compensação <i>shunt</i>	142
Circuito 5.2	Quadripolo de uma admitância <i>shunt</i>	143
Circuito 5.3	Associação de quadripolo de linha com compensador <i>shunt</i>	143
Circuito 5.4	Compensação série de uma linha nas extremidades	146

Diagrama 1.1	Interligação elétrica	12
Diagrama 1.2	Parâmetros distribuídos em uma linha de transmissão	19
Diagrama 2.1	Diagrama de treliças para a tensão na linha	60
Diagrama 2.2	Diagrama genérico de treliças para cálculo de tensão	61
Diagrama 3.1	Quadripolo do trecho da LT	77
Diagrama 5.1	Compensação série no meio da linha	145

Desenho 4.1	Efeito pelicular	107
Desenho 4.2	Linha monofásica composta por uma série de condutores	112
Desenho 4.3	Linha trifásica com dois cabos por fase	114
Desenho 4.4	Transposição de uma linha de transmissão	115
Desenho 4.5	Linha monofásica a dois condutores	116
Desenho 4.6	Capacitância em relação ao neutro	117
Desenho 4.7	Efeito do terra na capacitância	118
Desenho 4.8	Possíveis configurações de fase em uma LT	120
Desenho 4.9	Configuração dos condutores em um cabo ACSR	122
Desenho 4.10	Linha para o Exemplo 4.5	124
Desenho 4.11	LT trifásica do Exemplo 4.8	126

Desenho 4.12	LT do Exemplo 4.8 com distâncias	127
Desenho 4.13	Linha trifásica do Exemplo 4.10	128
Desenho 4.14	LT trifásica do Exemplo 4.11	129
Desenho 4.15	Efeito do terra na LT do Exemplo 4.11	131
Desenho 4.16	Fase da linha do Exercício 3	132
Desenho 4.17	Linhas do Exercício 3	133
Desenho 4.18	Configuração da LT do Exercício 4	133
Desenho 4.19	Linha trifásica do exercício proposto 5	134
Desenho 4.20	LT trifásica do Exercício 9	134

Fotografia 4.1	Cabo de condutores	113
-----------------------	--------------------	------------

Gráfico 1.1	Gráficos da tensão V e da corrente I ao longo do comprimento da linha	41
Gráfico 2.1	Ondas de tensão e corrente trafegando na linha no intervalo $0 \leq t < T$	64
Gráfico 2.2	Ondas de tensão e corrente trafegando na linha no intervalo $T \leq t \leq 2T$	65
Gráfico 2.3	Ondas de tensão e corrente trafegando na linha no intervalo $2T \leq t \leq 3T$	65
Gráfico 2.4	Ondas de tensão e corrente trafegando na linha ao longo do tempo	66
Gráfico 2.5	Ondas de tensão e corrente trafegando na linha no intervalo $0 \leq t < T$	68
Gráfico 2.6	Ondas de tensão e corrente trafegando na linha no intervalo $T \leq t \leq 2T$	68
Gráfico 2.7	Tensão no início da linha	74
Gráfico 2.8	Tensão no final da linha	74
Gráfico 4.1	Variação da resistência com a frequência	109
Gráfico 4.2	Variação da resistência com a frequência	109
Gráfico 4.3	Variação da resistência com a temperatura	110
Gráfico 4.4	Resposta do Exemplo 3: variação da resistência com a temperatura para cabo <i>Turkey</i> .	122
Gráfico 5.1	Tensão no final da LT em função de seu comprimento	139
Gráfico 5.2	Tensão no final da linha em vazio em função do comprimento da linha	147
Gráfico 5.3	Perfil de tensão na linha do Exemplo 5.2	151

Gráfico 5.4	Perfil de tensão na linha do Exemplo 5.5	156
Gráfico 5.5	Tensão ao longo da linha de meia onda do exemplo 5.10	165

Quadro 3.1	Constantes generalizadas para os modelos de linha	85
-------------------	---	-----------

Tabela 3.1	Limites para modelo de linha curta	80
Tabela 3.2	Limites para modelo de linha média	83
Tabela 3.3	Constantes generalizadas das linhas do Exemplo 3.2	94
Tabela 3.4	Resultados do Exemplo 3.3	95
Tabela 4.1	Resistividade de alguns materiais	107
Tabela 4.2	Resistência de um cabo <i>Turkey</i>	121
Tabela 5.1	Comparação dos resultados da compensação no Exemplo 5.7	161
Tabela 5.2	Comparação dos resultados potência transmitida no Exemplo 5.8	162

LISTA DE SÍMBOLOS E NOTAÇÕES

Símbolo/notação	Descrição
kcmil	1000 circular mils.
$Y = Y_u \times l$	Admitância equivalente da linha [S]
$Y_u = G_u + jB_u$	Admitância por unidade de comprimento da linha $[S/m]$
$\text{arctgh}(x)$	Arco tangente hiperbólico de x
ACSR	Cabo de alumínio com alma de aço (<i>Aluminum conductor steel-reinforced</i>)
C	Capacitância equivalente da linha [F]
C_u	Capacitância por unidade de comprimento da linha $[F/m]$
cmil	Circular mil. Equivale a uma área igual à de um círculo com diâmetro de 1 milésimo de polegada ou $5,067 \times 10^{-6} \text{cm}^2$
l	Comprimento da linha [m]
λ	Comprimento de onda [m]
G	Condutância equivalente da linha [S]
G_u	Condutância por unidade de comprimento da linha $[S/m]$
S*	Conjugado de um número complexo/fasor
α	Constante de atenuação da linha $[rad/s]$
β	Constante de fase da linha $[Np/m]$
$\gamma = \alpha + j\beta$	Constante de propagação da linha $[m^{-1}]$

A, B, C, D	Constantes generalizadas do quadripolo
$\cosh(x)$	Cosseno hiperbólico de x
$\dot{V} = \dot{V} \angle \theta$	Fasor com módulo $ \dot{V} $ e fase θ graus
f	Frequência [Hz]
Z_c	Impedância característica da linha
$Z = Z_u \times l$	Impedância equivalente da linha [Ω]
Z_0 ou Z_{0s}	Impedância natural da linha
$Z_u = R_u + jX_u$	Impedância por unidade de comprimento da linha [$\frac{\Omega}{m}$]
L	Indutância equivalente da linha [H]
L_u	Indutância por unidade de comprimento da linha [$\frac{H}{m}$]
LT	Linhas de transmissão
$ \dot{V} , V $	Módulo de um número complexo/fasor
$Z = Z \angle \theta$	Número complexo com módulo $ Z $ e fase θ graus
$\text{Im}\{x\}$	Parte imaginária de um número complexo
$\text{Re}\{x\}$	Parte real de um número complexo
p.u.	Por unidade
$S = P + jQ$	Potência aparente [VA]
$S_{3\phi}$	Potência aparente trifásica
P	Potência ativa [W]
Q	Potência reativa [VA_R]
$X = \omega L$	Reatância indutiva equivalente da linha [Ω]
$X_u = \omega L_u$	Reatância indutiva por unidade de comprimento da linha [$\frac{\Omega}{m}$]
R	Resistência equivalente da linha [Ω]
R_u	Resistência por unidade de comprimento da linha [$\frac{\Omega}{m}$]

$\sinh(x)$	Seno hiperbólico de x
$B_u = \omega C_u$	Susceptância por unidade de comprimento da linha $[S/m]$
$\operatorname{tgh}(x)$	Tangente hiperbólica de x
$\dot{V}_{fase}, \dot{I}_{fase}$	Tensão/corrente de fase
$\dot{V}_{Linha}, \dot{I}_{Linha}$	Tensão/corrente de linha
j	Unidade imaginária $[j = \sqrt{-1}]$
$\omega = 2\pi f$	Velocidade angular $[rad/s]$
v	Velocidade de propagação $[m/s]$

APRESENTAÇÃO

Diante do desafio de um curso de transmissão de energia, optamos neste livro pela abordagem temática dos assuntos como aplicação nos exercícios práticos resolvidos e propostos sem, no entanto, descuidar da necessária fundamentação teórica, que permite estabelecer a conexão da exposição dos temas.

Na presente edição, o livro está constituído de cinco capítulos. Cada capítulo tem um texto teórico elaborado como um resumo dos principais fundamentos, em linguagem clara e a apresentação e formulação em equações, cuja demonstração matemática completa foi omitida. As únicas demonstrações presentes no livro são as que exprimem um raciocínio teórico ou a solução de um exercício. Estas demonstrações servem como revisão para facilitar o contato do aluno com temas que se supõem já terem sido estudados anteriormente em outras disciplinas, agora aplicados especificamente em sistemas de energia.

Cada capítulo apresenta uma série de exercícios resolvidos que orientam a aplicação da teoria em problemas práticos de engenharia em sistemas de potência. Alguns dos exercícios apresentam maior nível de complexidade e conduzem o aluno a desenvolver a capacidade de extrapolação e raciocínio pessoal para a indicação de soluções de problemas reais.

O conteúdo foi baseado nos livros clássicos de sistemas de potência adotados na maioria dos cursos de engenharia elétrica, de autores como Stevenson, Zanetta, Fuchs, Dorel, entre outros. Também foi levada em conta a experiência docente em ministrar disciplinas como Ondas Eletromagnéticas e Linhas de Transmissão e Transmissão de Energia na proposta de trabalho, para auxiliar os professores que adotarem este livro em sala de aula.

A abrangência do conteúdo não se destina a um curso aprofundado de Transmissão de Energia, mas contém os tópicos necessários para o estudo e a aplicação de muitos casos reais. A cobertura dos temas abordados é apropriada para uma disciplina de 60 horas/aula, recomendado para um curso do nível profissionalizante de engenharia elétrica, onde os alunos já possuem um conhecimento prévio e uma preparação teórica sobre teoria de eletromagnetismo, ondas eletromagnéticas e de circuitos elétricos monofásicos e trifásicos.

Mesmo assim, nos Capítulos 1 e 2 foi feita uma revisão sucinta da teoria de ondas em linhas de transmissão para orientar o aluno. Os Capítulos 3, 4 e 5 preparam o estudo da modelagem de linhas que pode ser complementado com simulações práticas em aplicativos como MatLab, PowerWord, entre outros.

Os aspectos de projetos de linhas, construção, manutenção, automação em comando e proteção, assim como análise de fluxos de potência estão embasados nestes tópicos.

Os autores
em junho de 2014

Transmissão de energia elétrica: teoria e prática em linhas aéreas é indicado aos estudantes de Engenharia Elétrica que já possuem conhecimento prévio sobre teoria de eletromagnetismo e circuitos elétricos. O livro oferece uma revisão sucinta da teoria de ondas em linhas de transmissão e prepara o estudo da modelagem de linhas, que pode ser complementado com simulações práticas em aplicativos como MatLab, PowerWord e outros. Apresenta, ainda, uma série de exercícios resolvidos que orientam a aplicação da teoria em problemas práticos de engenharia em sistemas de potência. Escrita em linguagem clara e didática, a obra tem como proposta levar o aluno de Engenharia Elétrica a desenvolver a capacidade de extrapolação e o raciocínio pessoal para a indicação de soluções de problemas reais.

ISBN 978-85-8293-020-8



9 788582 930298 >

**CONEXÃO
INICIAL**