



CRICTE 2017

XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia



MODELAGEM DE UM TRECHO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE IJUÍ A PARTIR DO CIRCUITO PI TRIFÁSICO

Luís F. Sauthier

Mestrando em Modelagem Matemática na UNIJUI e pesquisador no Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC) da UNIJUI

luisfernandosauthier@gmail.com

Andressa T. Diefenthäler

Mestranda em Modelagem Matemática na UNIJUI e pesquisadora no GAIC

andressa_td@hotmail.com

Airam T. Z. R. Sausen

Prof. Dra. coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da UNIJUI e pesquisadora no GAIC

airam@unijui.edu.br

Paulo S. Sausen

Prof. Dr. do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da UNIJUI e pesquisador no GAIC

sausen@unijui.edu.br

Maurício de Campos

Prof. Me. do curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI e pesquisador no GAIC

campos@unijui.edu.br

Resumo. A demanda por energia elétrica de qualidade tem fomentado a discussão de conceitos como geração distribuída e Smart Grids. A incorporação destas tecnologias ao Sistema Elétrico de Potência brasileiro representa um desafio, em virtude do mesmo ter sido desenvolvido no século passado. Deste modo, torna-se fundamental representar e simular redes de distribuição de energia. Para a modelagem matemática de tais sistemas, na literatura destaca-se o modelo PI. Diante disto, esta pesquisa objetiva realizar a modelagem de um trecho da rede de distribuição de energia elétrica de uma concessionária de Ijuí/RS, a partir do circuito PI trifásico. Através da implementação e simulação do modelo no Simulink/Matlab, os resultados obtidos são comparados com os dados coletados de um trecho da rede real. Assim, foi possível validar o modelo e verificar a semelhança nas variações de tensão nas três fases, o que

propicia a simplificação do sistema como monofásico.

Palavras-chave: Modelagem matemática. Simulação computacional. Rede de distribuição de energia elétrica.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a cadeia de valores de energia envolve três processos principais: geração, transmissão e distribuição. Assim, o Sistema Elétrico de Potência (SEP) constitui-se como um conjunto de elementos que possibilitam o fornecimento de energia a partir destes três processos.

O SEP brasileiro foi desenvolvido no século passado e, desde então, incorporou poucas das tecnologias disponíveis, tornando-se um empecilho para os avanços na área energética.

A crescente demanda por energia de qualidade pelos consumidores, aliada às

crescentes preocupações ambientais, também têm fomentado a geração de energia de fontes renováveis, assim como o desenvolvimento da geração distribuída.

Diante disto, torna-se importante a existência de ferramentas que possibilitem o desenvolvimento, o gerenciamento e a incorporação de novas tecnologias ao sistema elétrico antigo.

Neste contexto, destaca-se o conceito de *Smart Grids*, i.e., Redes Inteligentes, as quais utilizam tecnologia de informação e equipamentos digitais com interface para os usuários. Desta forma, é possível fornecer indicadores quanto a situação energética de uma determinada região ou grupo de consumidores, controlando a geração distribuída (Ana Júlia [1]).

No entanto, para a inserção de tais recursos e análise dos impactos de sua incorporação ao sistema elétrico antigo, é de fundamental relevância representar e descrever o comportamento da rede elétrica. Assim, a modelagem matemática de redes de distribuição de energia configura-se como uma ferramenta importante, pois possibilita simular computacionalmente o sistema real.

Sendo assim, esta pesquisa objetiva realizar a modelagem matemática de um trecho da rede de distribuição de energia do Departamento Municipal de Energia Elétrica de Ijuí (DEMEI), a partir do circuito PI trifásico. Através deste estudo, pretende-se validar o modelo e verificar a semelhança no comportamento das três fases do sistema, possibilitando a simplificação do mesmo, tratando-o como um sistema monofásico.

Para a construção e a simulação computacional do modelo, é utilizada a ferramenta *Simulink (Simscape)* do software *Matlab*. O modelo é validado a partir da comparação dos resultados simulados com os dados coletados de um trecho da rede real da concessionária DEMEI.

Assim, o artigo está estruturado do seguinte modo: na Seção 2 será abordado brevemente acerca do modelo PI, e os trabalhos correlatos. Na Seção 3, é caracterizado o trecho a ser modelado e os dados utilizados. A Seção 4 abrange a

simulação computacional, os resultados e as discussões. Após, são apresentadas as considerações finais.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Dentre os modelos matemáticos da literatura utilizados na modelagem de redes de distribuição de energia elétrica, destaca-se o modelo PI (José et. al. [2]). Nesta pesquisa, o trecho a ser modelado possui 615,8m de extensão, o que implica na utilização do modelo PI para linhas curtas (menores de 80km) com parâmetros concentrados (Jonas et. al. [3]), o qual é apresentado na Fig. 1 e descrito pela Eq. (1) e Eq. (2).

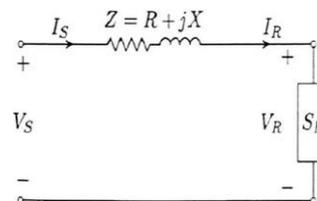


Figura 1. Modelo PI [3]

$$V_S = V_R + Z \cdot I_R \quad (1)$$

$$I_S = I_R \quad (2)$$

Onde: V_S e I_S são a tensão e a corrente de entrada, V_R e I_R são a tensão e a corrente de saída do sistema. Z , é a impedância total descrita por $Z = r + jx$ (onde r é a resistência total da linha e x é a reatância indutiva).

Sistemas de distribuição de energia elétrica são formados por linhas trifásicas. Porém, conforme Ref. [3], na modelagem de redes de curta extensão, o sistema geralmente pode ser representado por um modelo equivalente por fase, ou seja, o sistema trifásico pode ser reduzido a um sistema monofásico equivalente, desde que ambas as fases estejam balanceadas.

2.1 Trabalhos correlatos

Dentre as pesquisas já realizadas pelo Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC), Ref. [3] implementou e validou o

modelo PI para um circuito em escala reduzida, o qual representa um segmento da rede de média tensão do DEMEI.

Em Ref. [1], o modelo PI foi validado para um trecho real da rede elétrica do DEMEI, sendo proposta a simulação do sistema a partir de três modelos elaborados no *Matlab/Simulink*: I. modelo PI para linhas curtas, isto é, implementação da Eq. (1) e Eq. (2); II. modelo PI com a carga, o qual considera a potência consumida no trecho como parâmetro para a obtenção de uma função polinomial que é incorporada às equações; e III. circuito equivalente ao modelo PI, o qual foi elaborado a partir dos blocos disponíveis na ferramenta *Simulink/Simscape*, considerando um sistema monofásico.

Desta forma, em Ref. [1] foi realizada a validação do circuito apenas para uma fase do trecho a ser modelado, utilizando o bloco do modelo PI monofásico. Diante disto, nesta pesquisa é realizada a implementação e validação do circuito PI trifásico, analisando a semelhança entre as fases e, assim, a validade da simplificação do sistema como monofásico.

3. CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO

A rede da concessionária DEMEI é constituída por quatro alimentadores e ramificada em sua extensão. Nesta pesquisa é considerado o mesmo trecho AC modelado em Ref. [1], isto é, o trecho inicial do Alimentador Ijuí-313 (rede de média tensão de 23,1 kV), conforme a Fig. 2.

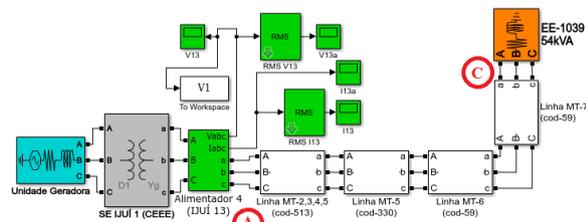


Figura 2. Trecho AC modelado [1].

Os dados referentes aos parâmetros dos cabos e características da rede, foram fornecidos pela concessionária, a partir da representação da rede na plataforma *E2MIG*,

e são apresentados na Tabela 1, onde: R_1 e R_0 são as resistências da sequência positiva e zero, respectivamente, dadas em Ω/km ; L_1 e L_0 são as indutâncias da sequência positiva e zero, dadas em H/km ; e l é a extensão dos cabos em km . A capacitância é praticamente nula, sendo utilizado o valor de $7,751e-9 F$ em todos os casos.

Tabela 1. Parâmetros dos cabos

Cod. cabo	R_1	R_0	L_1	L_0	l
513	0,211	0,303	8,04e-4	8,04e-4	0,107
330	0,187	0,365	1,08e-3	4,93e-3	0,289
59	0,696	0,874	1,39e-3	5,24e-3	0,201
59	0,696	0,874	1,39e-3	5,24e-3	0,019

A aquisição dos dados foi realizada através de analisadores de energia, os quais fornecem informações como tensão, corrente e potência na entrada e na saída do sistema (trecho AC da Fig. 2), das três fases, com medições a cada 5 minutos no decorrer de uma semana (24/10/2016 a 31/10/2016), totalizando um conjunto de 2016 dados.

4. MODELAGEM DE UM TRECHO DA REDE: CIRCUITO PI TRIFÁSICO

O modelo circuito PI trifásico foi construído através de blocos disponíveis na biblioteca *Power Systems* do *Simscape/Simulink*, uma ferramenta do *Matlab*. Os dados de entrada do sistema referem-se a tensão medida na saída do Alimentador AL-313 em cada fase (ponto A), aos parâmetros dos cabos, frequência nominal (60Hz), voltagem nominal (16334,17V), potência ativa e potência reativa indutiva de cada fase.

4.1 Simulação computacional

Para a simulação computacional, foi elaborado o circuito correspondente ao modelo PI trifásico, apresentado na Fig. 3, onde: V_{sA} , V_{sB} e V_{sC} correspondem às tensões de entrada (dados coletados na saída do Alimentador AL-313) de cada uma das fases do sistema, e V_{rA} , V_{rB} e V_{rC} às tensões de saída.

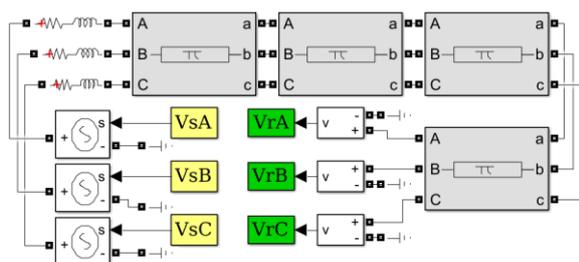


Figura 3. Circuito PI trifásico.

4.2 Resultados e discussão

A partir da simulação computacional, é possível realizar uma análise comparativa entre as tensões de saída simuladas pelo modelo e as experimentais (medidas na rede real), sendo estimado o erro médio percentual referente a cada fase do sistema, conforme a Tabela 2, onde: t são as unidades amostrais, $VrAe$ (1), $VrBe$ (3), $VrCe$ (5) são as tensões de saída experimentais de cada fase (em kV) e $VrAs$ (2), $VrBs$ (4), $VrCs$ (6) são as tensões simuladas pelo modelo (kV).

Tabela 2. Resultados experimentais e simulados para cada fase do sistema

t	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	13,1	12,9	12,9	12,9	13,0	12,9
2	13,2	12,9	12,8	12,9	13,1	12,9
3	13,1	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2014	12,9	12,8	12,8	12,8	13,3	12,8
2015	12,9	12,7	12,7	12,8	13,3	12,7
2016	12,9	12,9	12,8	12,9	13,4	12,8
Erro (%)	1,42	1,58	1,69			

A partir dos resultados, verifica-se que as tensões de cada fase do sistema apresentam comportamentos semelhantes, além de um erro médio inferior a 2% em todos os casos, o que evidencia a acurácia do modelo e também a possibilidade de representação do sistema como monofásico, considerando este trecho da rede real.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do estudo realizado, foi possível implementar e validar o circuito PI trifásico na representação de um trecho da rede de distribuição de energia elétrica da concessionária DEMEI. Além disso, pode-se verificar a semelhança no comportamento das três fases do sistema, em virtude do balanceamento das cargas. Desta forma, é possível representar o sistema com circuitos monofásicos, corroborando com a maioria dos casos apresentados na literatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos, à UNIJUÍ pela estrutura física oferecida e ao DEMEI pelo aporte financeiro à pesquisa, a partir do Projeto de P&D com a ANEEL.

REFERÊNCIAS

- [1] A. J. S. Silva, “Modelagem Matemática de um Sistema de Distribuição Primário de Energia Elétrica em Média Tensão do Município de Ijuí”, Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática, UNIJUÍ, 2017.
- [2] J. Morales, et. al., “Induced over voltages produced by atmospheric discharges considering JMarti and Pi distribution lines models”, In International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), IEEE, 2014. DOI: 10.1109/ROPEC.2014.7036321.
- [3] J. F. Schreiber, et. al., “Mathematical Modeling of an Electrical Power Distribution System for Applications in Smart Grids”, Advances in Engineering Research, Nova Science Publishers, volume 16, chapter 1, pages 12-32, 2017.