

Modelagem de Cargas para Estudos de Regime Permanente, de Transientes e de Componentes Harmônicas em Sistemas Elétricos de Potência

Marcelo Brunoro
Instituto Federal do Espírito Santo
Vitória, Espírito Santo, Brasil
mbrunoro@ifes.edu.br

Lucas F. Encarnação e Jussara F. Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória, Espírito Santo, Brasil
lucas.encarnacao@ufes.br, jussara.fardin@ufes.br

Resumo—A modelagem apropriada dos diversos elementos que compõem o sistema elétrico de potência é necessária para a realização de estudos e análises com a exatidão requerida. Assim, a representação de cargas no sistema elétrico deve ser adequada ao tipo de estudo a ser realizado, sendo relevante a correta escolha do modelo que, com simplicidade, representará satisfatoriamente a carga na análise pretendida. Outro aspecto relevante é o método para determinar os parâmetros relacionados ao modelo, que deve ser capaz de minimizar o erro entre o sistema real e o modelado. Tais parâmetros podem ser obtidos por técnicas baseadas em componentes ou em medições. Porém, a inserção cada vez maior de cargas não lineares no sistema elétrico, dificulta o processo de determinação destes parâmetros. Neste artigo são apresentados os principais modelos de cargas estáticas e dinâmicas, bem como representações baseadas em modelos físicos e caixa preta. Métodos de modelagem considerando distorções harmônicas também são tratados. Além disso, é mostrado um resumo contendo modelos, métodos e aplicações de diversas bibliografias acerca da modelagem de cargas.

Palavras Chave—Modelo de carga, Modelo estático, Modelo dinâmico, Modelagem harmônica de carga.

I. INTRODUÇÃO

Estudos sobre o sistema elétrico de potência (SEP) demandam a representação de vários elementos, como fontes, redes, eventos e cargas. Sendo que o modelo adotado para cada elemento deve ser adequado ao tipo de análise pretendida, inclusive para a modelagem da carga.

A modelagem de cargas conectadas aos barramentos do sistema é complexa e requer simplificações. Tal dificuldade ocorre devido à diversidade destas cargas e de sua mudança de composição, dependendo de fatores temporais, climáticos, econômicos, entre outros [2, 3]. Segundo [7] a modelagem de cargas do SEP é importante para realizar simulações e, em especial, para a análise do fluxo de potência e para diversos estudos de estabilidade. Entretanto, modelos inapropriados ou imprecisos podem fornecer resultados ambíguos.

Análises de regime permanente e de fluxo de potência requerem modelos estáticos e estudos de transitórios e de estabilidade necessitam de modelos dinâmicos. No caso dos modelos estáticos pode-se citar o exponencial e o polinomial e

no caso dos dinâmicos o modelo do motor de indução, o composto e o de recuperação exponencial.

De acordo com [9] o uso de cargas não lineares no SEP, como conversores estáticos de energia, dispositivos de arco e dispositivos magnéticos saturados, alteram a característica senoidal da corrente alternada e, conseqüentemente, das quedas de tensão ao longo do sistema. Assim, este fluxo de componentes harmônicas de corrente, no sistema elétrico, além de aumentar as perdas em dispositivos eletromagnéticos, tais como motores e transformadores, também podem causar interferência em diversos equipamentos e em circuitos de comunicação. Portanto, é imprescindível a caracterização do comportamento harmônico de cargas em estudos sobre perdas e sobre as componentes harmônicas de tensão e corrente.

Uma classificação adotada na literatura é a de modelo físico e modelo caixa preta. No modelo físico a carga é representada por elementos que tem significado físico como, por exemplo, o modelo do motor de indução. De modo oposto, o modelo caixa preta, descreve a relação entre os valores dos sinais de entrada e de saída, sem o compromisso do significado físico na modelagem. O modelo caixa preta pode ser representado por equacionamento matemático, através de funções de transferência ou equações diferenciais, ou por técnicas de inteligência artificial, como as redes neurais artificiais [7, 10].

Há duas abordagens para modelagem de cargas no domínio do tempo, uma baseada em componentes e outra em medições. Na primeira, a carga é modelada como uma superposição de cargas previamente conhecidas, sendo considerada complexa para grande quantidade de cargas. Diferentemente, na segunda, não é necessário conhecer as várias componentes de carga e sim a estrutura do modelo que, uma vez corretamente parametrizado, terá um comportamento próximo ao da carga. Entretanto, medidores de grandezas elétricas deverão ser instalados nas várias barras do SEP, onde se deseja modelar as cargas. As medições obtidas previamente serão utilizadas para determinar os parâmetros do modelo através da minimização do erro entre as medidas e a saída modelada [2, 10-12]. Uma discussão sobre estas abordagens pode ser vista em [1] e um estudo envolvendo as duas abordagens pode ser visto em [13].

Nesse contexto, diferente de outros trabalhos, este artigo apresenta os principais modelos de cargas estáticas e dinâmicas

adotadas em estudos de transitórios e de regime permanente, bem como de componentes harmônicas acerca do SEP, citando os principais métodos adotados para determinar os parâmetros destes modelos. Apresenta, também, de forma resumida os modelos, métodos e aplicações de diversos trabalhos.

II. MODELOS ESTATÍCOS E DINÂMICOS DE CARGA

Geralmente, os modelos de cargas são classificados em duas grandes categorias: modelos estáticos e modelos dinâmicos [2]. Um levantamento de vários trabalhos com modelos estáticos e dinâmicos de cargas, com resumo da representação matemática e faixa de valores dos parâmetros, pode ser visto em [14].

A. Modelo Estático

Modelos estáticos expressam as características da carga, em qualquer instante de tempo, em função da magnitude e frequência da tensão do barramento da carga. Nele a componente ativa e a componente reativa da potência da carga são consideradas separadamente. Este modelo é indicado apenas para situações onde as variações de tensão e frequência são pequenas ou lentas, onde o regime permanente é alcançado rapidamente. O modelo estático também pode ser aplicado quando o interesse está voltado somente para análises de regime permanente. A maioria das cargas compostas tem este tipo de comportamento e a modelagem estática pode ser empregada [2, 10, 12].

O modelo estático é usualmente representado na literatura como modelo exponencial e polinomial [2, 4, 5, 15, 17].

1) Modelo Exponencial

A representação do consumo de potência ativa P e reativa Q de uma carga conectada a um barramento, em função da magnitude de sua tensão V , é descrita pelas Eq. 1 e 2.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^a \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^b \quad (2)$$

onde o subscrito 0 representa a condição inicial da respectiva variável. O expoente a , tipicamente, assume valores entre 0,5 e 1,8 e b entre 1,5 e 6, este último variando não linearmente com a tensão, devido a elementos saturáveis na composição da carga. Um levantamento de referências da faixa de variação dos valores dos coeficientes a e b pode ser visto em [5]. Adicionalmente, este trabalho, mostra que, em sistemas de alta tensão contendo capacitores para correção do fator de potência, podem ser obtidos valores irreais para o expoente b .

No modelo exponencial a dependência da frequência do barramento f pode ser expressa multiplicando-se as Eq. 1 e 2 por $1 + K_f(f - f_0)$, sendo K_f para a potência ativa e reativa, geralmente, entre 0 e 3 e entre -2 e 0, respectivamente.

Conforme [6] um modelo mais genérico pode ser construído pela adição de várias componentes exponenciais para descrever a relação entre a tensão e a potência da carga.

2) Modelo Polinomial ou ZIP

A partir da formulação do modelo exponencial, pelas Eq. 1 e 2, é possível representar cargas com característica de potência, corrente ou impedância constante, com expoentes iguais a 0, 1 ou 2, respectivamente. A denominação ZIP pode ser utilizada devido à composição do modelo pelas componentes de impedância (Z), corrente (I) e potência (P) constante. Esta representação é mostrada nas Eq. 3 e 4.

$$P = P_0 \left[p_z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_I \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_P \right] \quad (3)$$

$$Q = Q_0 \left[q_z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_I \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_P \right] \quad (4)$$

onde os coeficientes p_z , p_I e p_P , cuja soma é igual a 1, definem a proporção de cada componente na caracterização da potência ativa da carga. O mesmo raciocínio pode ser aplicado aos coeficientes da potência reativa.

No modelo polinomial a dependência da frequência também pode ser obtida como descrito no modelo exponencial.

A superposição dos modelos ZIP e exponencial pode ser usada para melhorar a caracterização de cargas compostas [2].

B. Modelo Dinâmico

O modelo dinâmico é necessário onde o transiente da carga é importante para o estudo do sistema em questão. O modelo dinâmico é capaz de representar a resposta transitória da carga, permitindo a realização de estudos de estabilidade de sistemas. Análises de sistemas com grande quantidade de motores elétricos requerem este tipo de representação [2].

A determinação dos parâmetros de modelos dinâmicos são problemas não lineares e podem ser resolvidos utilizando técnicas de estimação não linear e de inteligência artificial [3, 10, 12]. Em SEP são utilizados métodos de identificação de modelos de sistemas dinâmicos no domínio da frequência e do tempo. Porém, este último é o método mais empregado [12]. Sugestões para escolha de modelos de cargas, nas simulações de fluxo de potência e de transientes, são apresentadas em [24].

1) Modelo do Motor de Indução

O motor de indução pode ser utilizado para caracterizar cargas compostas conectadas às barras de um sistema. Isto se deve ao fato do motor de indução ser uma carga muito utilizada em sistemas elétricos típicos, determinando a dinâmica do sistema. Assim, é razoável que esta dinâmica seja representada pelo modelo de um motor de indução adequadamente parametrizado [7]. Vários modelos dinâmicos baseados em motores de indução são apresentados em [29].

2) Modelo Composto

O modelo composto é capaz de caracterizar cargas agregadas, com grande diversidade de componentes de carga. Sua denominação se justifica, pois este modelo é formado pela combinação de modelos estáticos e dinâmicos [2]. O modelo composto pode ser representado por uma carga descrita pelo modelo estático, por exemplo, tipo exponencial ou polinomial,

em paralelo com um motor de indução, representando a parte dinâmica da carga [10]. Este modelo vem sendo amplamente utilizado para descrever o comportamento de cargas, especialmente em estudos de estabilidade de sistemas [31].

3) Modelo de Recuperação Exponencial

O modelo de recuperação exponencial é amplamente utilizado para descrever o comportamento dinâmico não linear de cargas agregadas. Desta forma, é possível representar a característica de recuperação exponencial das potências ativa e reativa da carga, causada pela variação de tensão ao longo do tempo [16, 18, 32]. Segundo [3] o comportamento de recuperação da carga, durante distúrbios, traz problemas para o sistema elétrico como o aumento do consumo de potência reativa, levando à redução da tensão no sistema de transmissão.

É possível expressar matematicamente, em função da tensão da carga V , a demanda de potência ativa P_d e reativa Q_d pelas Eq. de 5 a 8.

$$T_p \frac{dP_r(t)}{dt} = -P_r(t) + P_0 \left[\frac{V(t)}{V_0} \right]^{N_{ps}} - P_0 \left[\frac{V(t)}{V_0} \right]^{N_{pt}} \quad (5)$$

$$P_d(t) = P_r(t) + P_0 \left[\frac{V(t)}{V_0} \right]^{N_{pt}} \quad (6)$$

$$T_q \frac{dQ_r(t)}{dt} = -Q_r(t) + Q_0 \left[\frac{V(t)}{V_0} \right]^{N_{qs}} - Q_0 \left[\frac{V(t)}{V_0} \right]^{N_{qt}} \quad (7)$$

$$Q_d(t) = Q_r(t) + Q_0 \left[\frac{V(t)}{V_0} \right]^{N_{qt}} \quad (8)$$

onde T_p e T_q são as constantes de tempo de recuperação de carga; P_r e Q_r são as potências ativa e reativa de recuperação da carga, respectivamente; P_0 , Q_0 e V_0 são, respectivamente, os valores iniciais de potência ativa, reativa e tensão da carga, antes da modificação do valor da tensão; e N_{pt} e N_{qt} , representam a dependência exponencial da tensão da carga para transientes, enquanto N_{ps} e N_{qs} , representam a mesma variação para regimes permanentes. Em [16] os autores mostram que modelos de recuperação exponencial linearizados fornecem excelentes resultados. Outras simplificações deste modelo podem ser vistas em [17, 18].

III. MODELAGEM HARMÔNICA DA CARGA

Com a presença cada vez maior de cargas não lineares conectadas ao SEP, a modelagem que considere componentes harmônicas torna-se imprescindível para estimar o impacto das cargas atuais ou de novos clientes no sistema, bem como para investigar a efetividade de técnicas para mitigar harmônicas. As principais modelagens harmônicas de cargas estão apresentação a seguir [35, 36]. Uma comparação entre modelos pode ser vista em [39].

A. Modelo de Fonte de Corrente Constante

Neste modelo cada componente harmônica da corrente de carga é representada por uma fonte de corrente constante.

Porém, uma limitação desta modelagem é que ela é indicada apenas para cargas com pouca dependência da tensão e para sistemas com reduzidas variações de tensão.

B. Modelo de Norton

No modelo de Norton cada componente harmônica da corrente de carga é representada pelo circuito equivalente de Norton, contendo uma admitância em paralelo com uma fonte de corrente. Cada componente harmônica de corrente está relacionada apenas com a componente harmônica de tensão de mesma ordem. Este modelo pode representar melhor a carga, se comparado como modelo de fonte de corrente constante, uma vez que variações da tensão agora podem ser percebidas. As componentes harmônicas, ímpares até a ordem N , da corrente de carga, para este modelo, estão mostradas na Eq. 9.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^3 \\ \dot{I}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_N^1 \\ \dot{I}_N^3 \\ \dot{I}_N^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_N^N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_N^1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Y_N^3 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & Y_N^5 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & Y_N^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^3 \\ \dot{V}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde $\dot{I}_L^h$ e $\dot{V}_L^h$ são as componentes harmônicas, de ordem h , da corrente e da tensão da carga, respectivamente; e $\dot{I}_N^h$ e Y_N^h são, respectivamente, a componente harmônica, de ordem h de corrente da fonte de corrente e a admitância submetida à componente harmônica da tensão, de ordem h , neste modelo.

C. Modelo de Matriz de Admitância Cruzada

Neste modelo leva-se em consideração que cada componente harmônica da corrente de carga é dependente das várias componentes harmônicas de tensão consideradas na análise, sendo a relação entre a corrente e as tensões dada por admitâncias. As componentes harmônicas, ímpares até a ordem N , da corrente de carga estão mostradas na Eq. 10.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^3 \\ \dot{I}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1^1 & Y_1^3 & Y_1^5 & \cdots & Y_1^N \\ Y_3^1 & Y_3^3 & Y_3^5 & \cdots & Y_3^N \\ Y_5^1 & Y_5^3 & Y_5^5 & \cdots & Y_5^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_N^1 & Y_N^3 & Y_N^5 & \cdots & Y_N^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^3 \\ \dot{V}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde $\dot{I}_L^h$ e $\dot{V}_L^h$ são as componentes harmônicas, de ordem h , da corrente e da tensão da carga, respectivamente; e Y_h^v é a admitância submetida à componente harmônica da tensão, de ordem v , utilizada na determinação da componente harmônica, de ordem h , da corrente de carga.

D. Modelo de Norton harmonicamente acoplado (HCN)

Este modelo é baseado no modelo de Norton, entretanto a construção da matriz de admitâncias considera que cada componente harmônica de corrente da carga pode ser afetada pelas várias componentes harmônicas de tensão da carga [40]. As componentes harmônicas, ímpares até a ordem N , da corrente de carga, para este modelo, estão mostradas na Eq. 11.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^3 \\ \dot{I}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_N^1 \\ \dot{I}_N^3 \\ \dot{I}_N^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_N^N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{N,1}^1 & Y_{N,1}^3 & Y_{N,1}^5 & \cdots & Y_{N,1}^N \\ Y_{N,3}^1 & Y_{N,3}^3 & Y_{N,3}^5 & \cdots & Y_{N,3}^N \\ Y_{N,5}^1 & Y_{N,5}^3 & Y_{N,5}^5 & \cdots & Y_{N,5}^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N,N}^1 & Y_{N,N}^3 & Y_{N,N}^5 & \cdots & Y_{N,N}^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^3 \\ \dot{V}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} \quad (11)$$

onde $\dot{I}_L^h$ e $\dot{V}_L^h$ são as componentes harmônicas, de ordem h , da corrente e da tensão da carga, respectivamente; $\dot{I}_N^h$ é a componente harmônica, de ordem h , de corrente da fonte de corrente; e $Y_{N,h}^v$ é a admitância submetida à componente harmônica da tensão, de ordem v , utilizada na determinação da componente harmônica, de ordem h , da corrente de carga.

Em situação onde o HCN não fornece a exatidão requerida, novos graus de liberdade podem ser incorporados adicionando-se outra matriz de admitâncias, submetidas ao conjugado das componentes harmônicas de tensão da carga [41].

Requisitos de medição devem ser observados para que não ocorram problemas de dados na identificação dos parâmetros do modelo. Entre eles pode-se citar: o espectro de tensão deve ser linearmente independente para existir somente um conjunto de parâmetros; o número de medições depende da quantidade de ordens harmônicas consideradas; a amplitude das componentes harmônicas de tensão deve ser suficientemente elevada para permitir a medição e baixa o bastante para evitar exageros e situações irreais [42].

IV. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO MODELO DA CARGA

O método para determinação dos parâmetros da carga está atrelado à abordagem baseada em componentes ou medições. Considerando a dificuldade na determinação das componentes de carga, a abordagem baseada em medições é mais utilizada.

Existem diferentes tipos de modelos de cargas e de métodos para determinar seus parâmetros. Na abordagem baseada em medições podem ser usadas técnicas como estratégias evolutivas, inteligência artificial e identificação de sistemas. Como a maioria dos modelos dinâmicos são não lineares, a desafiadora tarefa de estimar seus parâmetros pode ser obtida com o auxílio dos mínimos quadrados não linear. Algoritmos genéticos (GA) e otimização por enxame de partículas (PSO) também são utilizados na parametrização dos modelos. Combinações de GA ou PSO com mínimos quadrados são aplicadas, com as melhores características destes métodos [10].

Modelos baseados em redes neurais artificiais (ANN) podem representar cargas não lineares. Sendo que diferentes estruturas de ANN estão disponíveis. Algumas desvantagens das ANN básicas são discutidas em [48].

Técnicas de identificação de sistemas, onde respostas aos distúrbios, juntamente com conhecimentos prévios no sistema, podem ser utilizadas para determinar o modelo dinâmico da carga [12]. As perturbações necessárias para a identificação dos seus parâmetros podem ocorrer naturalmente ou serem provocadas artificialmente, desde que afetem as condições de operação do sistema [7]. Circunstâncias práticas para provocar distúrbios são retratadas em [43], como chaveamento de capacitores, mudança de *tap* de transformador, variação de carga e injeção de corrente. É importante que os dados

coletados do sistema contenham informações sobre as características que se pretende modelar. Por exemplo, somente com dados de regime permanente não é possível modelar características transitórias do sistema [12].

Na Tabela I são apresentados, resumidamente, modelos de carga e respectivos métodos de determinação de parâmetros nas aplicações tratadas em várias referências bibliográficas.

TABELA I. RESUMO DE TRABALHOS COM MODELAGEM DE CARGA

Ref.	Modelo ^a	Método ^a	Aplicação
[1]	<i>Component-based</i>	<i>Typical values</i>	Análise de regime permanente
[4]	ZI	LR	
[5]	EL	---	
[6]	ZIP	AM	
[8]	CL(EL+IM)	Newton-Raphson	
[7]	CL(ZIP+IM)	Nonlinear LSM	Análise de transientes
[10]	CL(EL+IM)	Nonlinear LSM, Improved PSO, GA	
[11]	1 st , 2 nd and 3 rd order TF	LSM	
[12]	CL	CaR, StC	
[13]	CL(ZIP+IM) based	ACS	
[15]	EL, ZIP, CL(EL/ZIP+IM)	Typical values	
[16]	ERL, AL, Linearized ERL, 1 st order IM	Nonlinear LSM	
[17]	ANN based CL	Two-layer ANN	
[18]	ERL, Linearized ERL	Adaptive SA	
[19]	CL(ZIP+IM)	ACS	
[20]	CL(ZIP+IM)	GA	
[21]	ERL	LSM	
[22, 23]	CL(ZIP+IM)	Nonlinear LSM	
[25]	CL(ZIP/EL+IM)	Nonlinear LSM	
[26]	CL(ZIP/EL+IM/DE)	Nonlinear LSM	
[27]	ERL	Nonlinear LSM	
[28]	ANN based ERL	Neuro-fuzzy	Análise harmônica
[30]	ANN	Adaptive Neuro-fuzzy	
[31]	CL(EL/ZIP+IM)	Extended KF	
[32]	ERL	Alternating LSM	
[33]	ANN based CL	Recurrent ANN	
[34]	SVM	Nonlinear Regression	
[37]	Dynamic ZIP	Jacobi optimization	
[38]	CL(Z constant+IM)	GA	
[35]	CS, N, CFAM	AM	
[36]	CS, N, HCN	LSM	
[39]	CS, N, HCN	AM	
[40]	Full HCN	AM	
[41]	N, HCN, Full HCN	LSM	
[42]	HNC	AM	
[43, 44]	N based	LSM	
[45-47]	N	AM	
[48, 49]	ANN	RBFNN and LUT	
[50]	10 th order TF	LSM	
[51]	ARX	LSM	
[52]	CFAM	AM	
[53]	CL Harmonic Fuzzy	Nonlinear programming	
[54, 55]	Harmonic Admittance	KF	
[56]	Amplitude/Phase ANN	ANN	
[57]	ANN	BP and LUT	

a. Onde:

ACS - Ant Colony Search
 AL - Adaptive Load Model
 AM - Algebraic Method
 ANN - Artificial Neural Network
 ARX - Autoregressive Exogenous
 BP - Back Propagation Network
 CaR - Compare and Resimulate
 CFAM - Crossed Frequency Admittance Matrix
 CL - Composed Load Model
 CS - Current Source Model
 DE - Difference Equation Model
 EL - Exponential Load Model
 ERL - Exponential Recovery Load Model
 GA - Genetic Algorithms

HCN - Harmonic Coupled Norton Model
 IM - Induction Motor Model
 KF - Kalman filter
 LR - Linear Regression
 LSM - Least Square Method
 LUT - Look-up Table
 N - Norton Model
 PSO - Particle Swarm Optimization
 RBFNN - Radial Basis Function ANN
 SA - Simulated Annealing
 StC - Simulate then Calculate
 SVM - Support Vector Machine
 TF - Transfer Function
 ZIP/ZI - Polynomial Model

V. CONCLUSÃO

Análises detalhadas do SEP requerem modelos apropriados do sistema em estudo para que os resultados atinjam os objetivos esperados. O que torna relevante o estudo da modelagem de cargas, sobretudo no contexto atual de elevação da quantidade de cargas não lineares conectadas ao SEP. Neste contexto, diversas abordagens podem ser utilizadas para representar cargas adequadamente.

Este artigo apresentou as principais estruturas utilizadas na modelagem de carga para análises transitórias, de regime permanente e de componentes harmônicas. Um resumo descrevendo a modelagem de carga adotada por diversos trabalhos foi abordado, citando seus métodos de estimação de parâmetros e aplicações.

É de suma importância a escolha adequada do modelo de carga para atingir a exatidão requerida na análise a ser realizada. Da mesma forma deve-se adotar um método compatível para estimar os parâmetros do modelo para que a representação da carga atenda o estudo em questão.

REFERÊNCIAS

- [1] A. J. Collin, J. L. Acosta, B. P. Hayes, and S. Z. Djokic, "Component-based aggregate load models for combined power flow and harmonic analysis," in *Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), 7th Mediterranean Conference and Exhibition on*, 2010, pp. 1-10.
- [2] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power System Stability and Control*: McGraw-Hill Education, 1994.
- [3] V. Terzija, G. Valverde, C. Deyu, P. Regulski, V. Madani, J. Fitch, et al., "Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, pp. 80-93, 2011.
- [4] J. R. Marti, H. Ahmadi, and L. Bashualdo, "Linear Power-Flow Formulation Based on a Voltage-Dependent Load Model," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 1682-1690, 2013.
- [5] J. V. Milanovic, "On unreliability of exponential load models," *Electric Power Systems Research*, vol. 49, pp. 1-9, 1999.
- [6] M. A. Michael, A. G. Petoussis, S. M. Stavrinou, and A. Polycarpou, "The impact of load modeling on power flow studies for the cyprus power system," in *Power Engineering Conference (UPEC), 2014 49th International Universities*, 2014, pp. 1-6.
- [7] K. Rudion, H. Guo, H. Abildgaard, and Z. A. Styczynski, "Non-linear load modeling - Requirements and preparation for measurement," in *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*, 2009, pp. 1-7.
- [8] P. Aree, "Power flow computation considering nonlinear characteristics of composite load model," in *Electrical Engineering Congress (IEECON), 2014 International*, 2014, pp. 1-4.
- [9] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, pp. 1-29, 2014.
- [10] P. Regulski, D. S. Vilchis-Rodriguez, S. Djurovic, and V. Terzija, "Estimation of Composite Load Model Parameters Using an Improved Particle Swarm Optimization Method," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 30, pp. 553-560, 2015.
- [11] C.-J. Lin, C. Yung-Tien, C. Y. Chiou, C. H. Huang, H. D. Chiang, W. Jin-Cheng, et al., "Dynamic load models in power systems using the measurement approach," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 8, pp. 309-315, 1993.
- [12] G. Siming and T. J. Overbye, "Parameter estimation of a complex load model using phasor measurements," in *Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-6.
- [13] Q. Chen, P. Ju, K. Q. Shi, Y. Tang, Z. Y. Shao, and W. Y. Yang, "Parameter estimation and comparison of the load models with considering distribution network directly or indirectly," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, pp. 965-968, 11// 2010.
- [14] "Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 523-538, 1995.
- [15] M. Döşoğlu and A. B. Arsoy, "Modeling and simulation of static loads for wind power applications," *Neural Computing and Applications*, vol. 25, pp. 997-1006, 2014.
- [16] C. Byoung-Kon, C. Hsiao-Dong, L. Yinhong, L. Hua, C. Yung-Tien, H. Der-Hua, et al., "Measurement-based dynamic load models: derivation, comparison, and validation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 1276-1283, 2006.
- [17] A. Keyhani, W. Lu, and G. T. Heydt, "Neural network based composite load models for power system stability analysis," in *2005 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, CIMSA 2005, July 20, 2005 - July 22, 2005*, Giardini, Naxos, Italy, 2005, pp. 32-37.
- [18] V. Knyazkin, C. A. Canizares, and L. H. Soder, "On the parameter estimation and modeling of aggregate power system loads," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 1023-1031, 2004.
- [19] P. Ju, C. Qin, F. Wu, H. Xie, and Y. Ning, "Load modeling for wide area power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, pp. 909-917, 5// 2011.
- [20] M. Jin, R.-m. He, D. Zhao-yang, and D. J. Hill, "Measurement-based Load Modeling using Genetic Algorithms," in *Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on*, 2007, pp. 2909-2916.
- [21] D. Karlsson and D. J. Hill, "Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 157-166, 1994.
- [22] B.-H. Kim and H. Kim, "Measurement-based estimation of the composite load model parameters," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 7, pp. 845-851, 2012.
- [23] A. Maitra, A. Gaikwad, P. Pourbeik, and D. Brooks, "Load model parameter derivation using an automated algorithm and measured data," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1-7.
- [24] "Standard load models for power flow and dynamic performance simulation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 1302-1313, 1995.
- [25] C. Byoung-Kon, C. Hsiao-Dong, L. Yinhong, C. Yung-Tien, H. Der-Hua, and M. G. Lauby, "Development of composite load models of power systems using on-line measurement data," in *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, 2006, p. 8 pp.
- [26] A. Maitra, A. Gaikwad, P. Zhang, M. Ingram, D. L. Mercado, and W. D. Woitt, "Using System Disturbance Measurement Data to Develop Improved Load Models," in *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES*, 2006, pp. 1978-1985.

- [27] H. Guo, K. Rudion, H. Abildgaard, P. Komarnicki, and Z. A. Styczynski, "Parameter estimation of dynamic load model using field measurement data performed by OLTC operation," in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-7.
- [28] A. Miranian and K. Rouzbehi, "Nonlinear Power System Load Identification Using Local Model Networks," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 2872-2881, 2013.
- [29] B. C. Lesieutre, P. W. Sauer, and M. A. Pai, "Development and comparative study of induction machine based dynamic P, Q load models," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 182-191, 1995.
- [30] A. Oonsivilai and M. E. El-Hawary, "Power system dynamic load modeling using adaptive-network-based fuzzy inference system," in *Electrical and Computer Engineering, 1999 IEEE Canadian Conference on*, 1999, pp. 1217-1222 vol.3.
- [31] A. M. Najafabadi and A. T. Alouani, "Real time estimation of sensitive parameters of composite power system load model," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES*, 2012, pp. 1-8.
- [32] J. Yang, M. Wu, Y. He, and Y. Xiong, "Identification and application of nonlinear dynamic load models," *Journal of Control Theory and Applications*, vol. 11, pp. 173-179, 2013.
- [33] A. Keyhani, L. Wenzhe, and G. T. Heydt, "Composite neural network load models for power system stability analysis," in *Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES*, 2004, pp. 1159-1163 vol.2.
- [34] W. Zhenshu, L. Linchuan, and N. Li, "Power Load Modeling Based on Wide-Area Measurements and Support Vector Machine," in *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, 2009, pp. 1-6.
- [35] M. E. Balci, D. Ozturk, O. Karacasu, and M. H. Hocaoglu, "Experimental verification of harmonic load models," in *Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International*, 2008, pp. 1-4.
- [36] C. F. ALMEIDA and N. KAGAN, "A novel technique for modeling aggregate harmonic-producing loads," in *CIREN 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt*, 2011, pp. 6-9.
- [37] A. Deese and C. O. Nwankpa, "Novel approach to measurement-based load modeling via analog and Jacobi-based methods," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 53, pp. 329-337, 2013.
- [38] J. Li, X. Li, W. Deng, Z. Xu, Q. Liu, and Y. Zhang, "Study on power systems transient stability considering traction power supply system measurement-based load model," in *Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 1430-1434.
- [39] A. S. Koch, J. M. A. Myrzik, T. Wiesner, and L. Jendernalik, "Evaluation and validation of Norton approaches for nonlinear harmonic models," in *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble*, 2013, pp. 1-6.
- [40] S. Yuanyuan, Z. Guibin, X. Wilsun, and J. G. Mayordomo, "A Harmonically Coupled Admittance Matrix Model for AC/DC Converters," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1574-1582, 2007.
- [41] A. B. Nassif, J. Yong, and W. Xu, "Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 4, pp. 363-375, 2010.
- [42] A. S. Folting, J. M. A. Myrzik, T. Wiesner, and L. Jendernalik, "Practical implementation of the coupled norton approach for nonlinear harmonic models," in *Power Systems Computation Conference (PSCC), 2014, 2014*, pp. 1-7.
- [43] R. Bagheri, J. Moghani, G. Gharehpetian, and S. Mirtalaei, "Determination of aggregated load power consumption, under non-sinusoidal supply using an improved load model," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1563-1569, 2009.
- [44] Y. Zhao, J. Li, and D. Xia, "Harmonic source identification and current separation in distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 26, pp. 1-7, 1// 2004.
- [45] C. A. Canesin, L. C. O. de Oliveira, J. B. Souza, D. D. O. de Lima, and R. P. Buratti, "A time-domain harmonic power-flow analysis in electrical energy distribution networks, using Norton models for non-linear loading," in *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on*, 2014, pp. 778-782.
- [46] M. J. Ghorbani, M. S. Rad, H. Mokhtari, M. E. Honarmand, and M. Youhannaie, "Residential Loads Modeling by Norton Equivalent Model of Household Loads," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific*, 2011, pp. 1-4.
- [47] M. Rylander and W. M. Grady, "Problems in the use of Norton equivalent models for single-phase nonlinear loads," in *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, 2010, pp. 1-7.
- [48] G. Chang and I. C. Cheng, "A neural network-based method of modeling electric arc furnace load for power engineering study," in *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, 2010, pp. 1-1.
- [49] G. W. Chang, "Modeling highly nonlinear load dynamics for harmonic assessment," in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-4.
- [50] A. M. Alkandari and O. Alduaij, "Using Z-Transform for Electric Loads Modeling in the Presence of Harmonics," *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol. 5, pp. 8-13, 2015.
- [51] E. W. Palmer and G. F. Ledwich, "Three phase harmonic modelling of power system loads," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, vol. 140, pp. 206-212, 1993.
- [52] J. A. Fuentes, A. Gabaldon, F. J. Canovas, and A. Molina, "Harmonic model of electronically controlled loads," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, 2000, pp. 1805-1810 vol. 3.
- [53] A. A. Romero, H. C. Zini, G. Ratta, and R. Dib, "A novel fuzzy number based method to model aggregate loads for harmonic load-flow calculation," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES*, 2008, pp. 1-8.
- [54] A. M. Al-Kandari and K. M. El-Naggar, "Recursive identification of harmonic loads in power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, pp. 531-536, 10// 2006.
- [55] S. K. Gunda, T. R. Kumar, and D. V. S. S. S. Sarma, "Implementation of Kalman filtering algorithm for Harmonic Load Impedance modelling of Electrical loads with Experimental Verification," in *India Conference (INDICON), 2012 Annual IEEE*, 2012, pp. 847-852.
- [56] M. Lamich, J. Balcells, M. Corbalan, L. Sainz, and C. Fernandez, "Modeling harmonics of networks supplying nonlinear loads," in *Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on*, 2014, pp. 2030-2034.
- [57] X. Qun, T. Shiyang, Z. Pengfei, and L. Guanglei, "Modeling Analysis for High Power Load with Voltage Source Harmonics," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific*, 2012, pp. 1-4.