

基于特征值灵敏度的负荷模型 对系统阻尼影响的分析方法

马进¹, 徐昊¹, 张国飞¹, 付红军², 胡扬宇², 孙素琴²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 河南电力调度通信中心, 河南省 郑州市 450052)

An Eigenvalue Sensitivity-Based Method to Analyze Effects of Load Model on System Damping

MA Jin¹, XU Hao¹, ZHANG Guofei¹, FU Hongjun², HU Yangyu², SUN Suqin²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Henan Electric Power Dispatching and Communication Center, Zhengzhou 450052, Henan Province, China)

ABSTRACT: Low frequency oscillation is extremely harmful to power system security. Load is an important constituent of power system, thus it is significant to analyze the effect on load model on system damping. A method of analyzing the effect of load model on system damping by eigenvalue sensitivity is proposed. Based on the analytical sensitivity expression of system eigenvalue to load model parameters, the analytical sensitivity expression of damping ration and oscillation frequency on load model parameters is deduced. The difficulty of analyzing the damping of multi-machine system by damping torque method can be avoided by the proposed method, and in this way the effect of load model on system damping can be focused to specific parameters, thus the problem that how load model influences system damping is solved. The effectiveness of the proposed method is verified by analysis results of the effect of synthetical load model on system damping in typical two-area four-machine system.

KEY WORDS: load model; eigenvalue; damping analysis; sensitivity calculation

摘要: 低频振荡对电力系统影响危害极大, 负荷是电力系统的重要组成部分, 因此分析负荷模型对系统阻尼的影响具有重要意义。提出了运用特征值灵敏度分析负荷模型对于系统阻尼影响的方法: 基于系统特征值对于模型参数的灵敏度解析式, 推导出阻尼比和振荡频率对模型参数的灵敏度解析式。此方法避开了运用阻尼转矩法分析多机系统阻尼这一难题, 并可把负荷模型对系统阻尼的影响定位在具体的参数上, 解决了负荷模型如何影响系统阻尼这一问题。通过分析2区域4机算例系统中综合负荷模型对系统阻尼的影响, 验

证了所提方法的有效性。

关键词: 负荷模型; 特征值; 阻尼分析; 灵敏度计算

0 引言

近年来, 随着电网的互联, 低频振荡现象时有发生, 对电力系统影响危害极大。虽然系统低频振荡现象是很多因素共同作用的结果, 但欠阻尼是这些因素中致命的^[1]。我国已在负荷模型的研究领域取得了显著成绩^[2-5]。负荷是电力系统的重要组成部分, 其模型的准确性对系统动态稳定分析影响很大^[6-8], 因此研究负荷模型对系统阻尼的影响十分必要。

阻尼转矩法是研究系统阻尼的一个有效方法, 但由于需建立系统的传递函数框图, 往往仅适用于单机系统^[9-10], 多机系统很难实现。因而运用阻尼转矩法分析多机系统的阻尼情况一直是一个难以突破的瓶颈。

本文首先建立综合负荷模型的线性化小扰动模型, 基于特征值对模型参数的灵敏度计算^[11-15], 推导出阻尼比和振荡频率对模型参数的灵敏度解析式; 最后通过摄动2区域4机系统综合负荷模型的参数, 分析其对系统阻尼的影响情况。

1 综合负荷的小扰动模型

特征值分析是研究低频振荡问题的有效方法, 为此本节建立综合负荷的线性化小扰动模型。

综合负荷的模型及结构详见文献[16-17], 其线

基金项目: 国家自然科学基金项目(50707009)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50707009).

性化小扰动模型状态方程为

$$\frac{d\Delta E'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_0}[\Delta E'_q - (X - X')\Delta I_d] - (s_0\Delta E'_d + E'_{d0}\Delta s) \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta E'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_0}[\Delta E'_d + (X - X')\Delta I_q] + (s_0\Delta E'_q + E'_{q0}\Delta s) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta s}{dt} = & \frac{T_0}{2H}[-2A(1-s_0)\Delta s - B\Delta s - DE(1-s_0)^{E-1}\Delta s] - \\ & \frac{1}{2H}(E'_{q0}\Delta I_q + I_{q0}\Delta E'_q + E'_{d0}\Delta I_d + I_{d0}\Delta E'_d) \end{aligned} \quad (3)$$

代数方程为

$$\Delta U_d = \Delta E'_d - X'\Delta I_q + R_a\Delta I_d \quad (4)$$

$$\Delta U_q = \Delta E'_q + X'\Delta I_d + R_a\Delta I_q \quad (5)$$

$$\begin{aligned} -(U_{px0}\Delta I_{xs} + I_{xs0}\Delta U_{px}) - (U_{py0}\Delta I_{ys} + I_{ys0}\Delta U_{py}) = \\ P_Z^*(2U_{px0}\Delta U_{px} + 2U_{py0}\Delta U_{py}) + \\ P_1^*\left(\frac{U_{px0}}{\sqrt{U_{px0}^2 + U_{py0}^2}}\Delta U_{px} + \frac{U_{py0}}{\sqrt{U_{px0}^2 + U_{py0}^2}}\Delta U_{py}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} -(U_{py0}\Delta I_{xs} + I_{xs0}\Delta U_{py}) + (U_{px0}\Delta I_{ys} + I_{ys0}\Delta U_{px}) = \\ Q_Z^*(2U_{px0}\Delta U_{px} + 2U_{py0}\Delta U_{py}) + \\ Q_1^*\left(\frac{U_{px0}}{\sqrt{U_{px0}^2 + U_{py0}^2}}\Delta U_{px} + \frac{U_{py0}}{\sqrt{U_{px0}^2 + U_{py0}^2}}\Delta U_{py}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中： E'_q 和 E'_d 分别为感应电动机的q轴暂态电动势和d轴暂态电动势； T'_0 为定子开路暂态时间常数； X 为同步电抗； X' 为暂态电抗； I_d 和 I_q 分别为d轴和q轴定子电流分量； s 为转差； T_0 为电动机在额定转速下的机械转矩； H 为电动机的惯性时间常数； A 、 B 、 C 、 D 、 E 为机械转矩中与转速相关的系数； U_d 、 U_q 分别为d轴定子电压分量和q轴定子电压分量； R_a 为定子电阻； U_{px} 、 U_{py} 分别为负荷节点在同步旋转x轴的电压分量、同步旋转y轴的电压分量； I_{xs} 、 I_{ys} 分别为网络同步旋转轴坐标系下ZIP静态负荷电流的x轴分量和y轴分量； P_Z^* 、 P_1^* 、 P_p^* 、 Q_Z^* 、 Q_1^* 、 Q_Q^* 分别代表恒阻抗负荷、恒电流负荷和恒功率负荷的有功功率和无功功率的比例系数。

2 阻尼比和振荡频率对模型参数灵敏度

特征值对某一模型参数的灵敏度^[11-15]为

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial p} = \frac{[\Psi_i \quad M] \begin{bmatrix} \frac{\partial(\partial f / \partial x)}{\partial p} & \frac{\partial(\partial f / \partial y)}{\partial p} \\ \frac{\partial(\partial g / \partial x)}{\partial p} & \frac{\partial(\partial g / \partial y)}{\partial p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_i \\ N \end{bmatrix}}{\Psi_i \Phi_i} \quad (8)$$

式中：

$$\begin{cases} M = -\Psi_i \frac{\partial f}{\partial y} \left[\frac{\partial g}{\partial y} \right]^{-1} \\ N = -\left[\frac{\partial g}{\partial y} \right]^{-1} \frac{\partial g}{\partial x} \Phi_i \end{cases}$$

式中： λ_i 为系统的第*i*个特征根； Ψ_i 、 Φ_i 为与 λ_i 对应的左右特征向量； p 为某一模型参数； f 、 g 分别为系统的状态方程组和代数方程组； x 、 y 分别为系统的状态向量和代数向量； $\partial f / \partial x$ 、 $\partial f / \partial y$ 分别为系统的状态方程组对状态向量和代数向量的偏导数矩阵； $\partial f / \partial g$ 、 $\partial f / \partial y$ 分别为系统的代数方程组对状态向量和代数向量的偏导数矩阵。

基于特征值对模型参数的灵敏度解析式可推导阻尼比和振荡频率对模型参数的灵敏度计算式。

设特征值为

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (9)$$

将式(9)的左右两边对模型参数求偏导

$$\frac{\partial \lambda}{\partial p} = \frac{\partial \sigma}{\partial p} \pm j \frac{\partial \omega}{\partial p} \quad (10)$$

阻尼比的定义为

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (11)$$

将式(11)整理可得

$$\sigma^2 = \zeta^2 \sigma^2 + \zeta^2 \omega^2 \quad (12)$$

左右两边对模型参数求偏导可得

$$\frac{\partial \zeta}{\partial p} = \frac{\sigma(1-\zeta^2) \frac{\partial \sigma}{\partial p} - \zeta^2 \omega \frac{\partial \omega}{\partial p}}{\zeta |\lambda|^2} \quad (13)$$

将式(10)(11)代入式(13)可得

$$\frac{\partial \zeta}{\partial p} = \frac{-\omega^2 \operatorname{Re}(\partial \lambda / \partial p) + \sigma \omega \operatorname{Im}(\partial \lambda / \partial p)}{|\lambda|^3} \quad (14)$$

振荡频率对模型参数的灵敏度计算式为

$$\frac{\partial \omega}{\partial p} = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Im}\left(\frac{\partial \lambda}{\partial p}\right) \quad (15)$$

由式(14)(15)可见，阻尼比和振荡频率对模型参数的灵敏度可以由特征值对模型参数灵敏度的实部和虚部表达。

获得了阻尼比和振荡频率对负荷模型参数的灵敏度，即可分析负荷模型是如何影响系统阻尼这一问题。灵敏度的正负和幅值分别反映了负荷模型参数在一定范围内波动时阻尼比和振荡频率的增减性和变化幅度，为系统动态稳定采取控制措施提供重要的理论依据。

3 算例分析

经典2区域4机系统的结构如图1所示。其L₇和L₉两处的负荷采用综合负荷模型，其参数如表1所示。

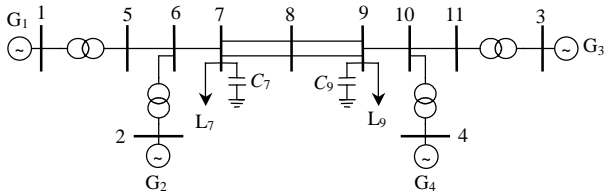


图1 2区域4机系统结构
Fig. 1 Structural diagram of two-area four-machine system

表1 L₇和L₉两处负荷的参数

Tab. 1 Parameters of the load in L₇ and L₉

参数	R _a /pu	X _a /pu	X _m /pu	R ₁ /pu	X ₁ /pu	A	B
L ₇	0.077	0.107	2.22	0.079	0.098	1	0
L ₉	0.035	0.094	2.8	0.048	0.163	1	0

参数	H	K _{pm}	M _{if}	P _Z [*]	P _p [*]	Q _Z [*]	Q _p [*]
L ₇	0.74	0.517	1.04	0.145	0.145	-0.561	-0.561
L ₉	0.93	0.306	1.03	0.208	0.208	-0.690	-0.690

本算例计算该系统阻尼比和振荡频率对综合负荷模型参数[R_a, X_a, X_m, R₁, X₁, H, A, B]的灵敏度，限于篇幅，本文仅采用一个区域振荡模式的灵敏度进行分析。

表2—9反映了负荷模型各个参数在其不确定性范围内变化时，阻尼比和振荡频率及其相应灵敏度的情况。表2中，阻尼比和振荡频率对R_a的灵敏度均为负值，说明随着R_a的增大，阻尼和振荡频率均将呈降低的趋势，与表2中的实际结果一致。表3中，当X_a由0.05增至0.107时，其阻尼比灵敏度为正值，阻尼将逐渐增强，而当X_a由0.2增至0.3时，其阻尼比灵敏度为负值，阻尼逐渐减弱；而其振荡频率的灵敏度一直为负值，振荡频率将随着X_a的增大而有所降低。表4中，X_m的灵敏度偏小，因而模式变化很小。表5中，阻尼比和振荡频率对R₁的灵敏度均为负值，说明随着R₁的增大，阻尼和振荡频率均将呈降低的趋势，与表5中的实际结果一致。表6中，X₁的阻尼比灵敏度为正，而振荡频率灵敏度为负，说明随着X₁的增大，阻尼将呈增强的趋势，而振荡频率均呈降低的趋势。表7中，阻尼比对H的灵敏度为负值，说明随着H的增大，阻尼将呈减弱的趋势。表8—9中，A、B的灵敏度均较小，因而模式变化很小。算例分析结果验证了运用阻尼比和振荡频率对模型参数的灵敏度分析负荷模型对系统模式影响的有效性。

表2 参数R_a的特征值灵敏度

Tab. 2 Eigenvalue sensitivity of parameter R_a

参数 p(R _a)	阻尼比ζ	∂ζ/∂p	振荡频率 f	∂f/∂p
0.010	-0.011 7	-0.219 3	0.494 5	-0.597 8
0.030	-0.013 4	-0.232 0	0.494 0	-0.609 8
0.050	-0.015 1	-0.243 6	0.494 0	-0.627 8
0.077	-0.017 6	-0.257 3	0.493 8	-0.668 1
0.100	-0.019 8	-0.266 3	0.493 6	-0.711 0
0.200	-0.029 5	-0.268 4	0.491 6	-0.933 6

表3 参数X_a的特征值灵敏度

Tab. 3 Eigenvalue sensitivity of parameter X_a

参数 p(X _a)	阻尼比ζ	∂ζ/∂p	振荡频率 f	∂f/∂p
0.050	-0.020 0	0.044 6	0.490 0	-1.448 8
0.107	-0.017 6	0.015 7	0.493 8	-1.207 3
0.200	-0.010 5	-0.059 3	0.494 5	-0.794 8
0.300	-0.014 6	-0.074 2	0.484 7	-0.595 3

表4 参数X_m的特征值灵敏度

Tab. 4 Eigenvalue sensitivity of parameter X_m

参数 p(X _m)	阻尼比ζ	∂ζ/∂p	振荡频率 f	∂f/∂p
2.22	-0.017 6	0.001 4	0.493 8	-0.100 0
2.40	-0.017 1	0.002 0	0.492 7	-0.086 6
2.80	-0.016 0	0.002 5	0.490 7	-0.065 0
3.20	-0.015 0	0.002 6	0.489 1	-0.050 5
3.80	-0.013 9	0.002 4	0.487 3	-0.036 5

表5 参数R₁的特征值灵敏度

Tab. 5 Eigenvalue sensitivity of parameter R₁

参数 p(R ₁)	阻尼比ζ	∂ζ/∂p	振荡频率 f	∂f/∂p
0.010	0.036 7	-4.058 5	0.505 1	-93.768 9
0.030	0.006 8	-3.712 5	0.495 9	-20.216 9
0.050	-0.007 1	-2.224 6	0.494 7	-12.011 2
0.079	-0.017 6	-1.315 9	0.493 8	-8.001 0

表6 参数X₁的特征值灵敏度

Tab. 6 Eigenvalue sensitivity of parameter X₁

参数 p(X ₁)	阻尼比ζ	∂ζ/∂p	振荡频率 f	∂f/∂p
0.050	-0.020 0	0.118 6	0.490 0	-0.644 2
0.098	-0.017 6	0.099 2	0.493 8	-0.494 3
0.150	-0.013 4	0.079 4	0.494 0	-0.313 9
0.200	-0.009 1	0.050 9	0.495 0	-0.120 0
0.250	-0.007 3	0.019 8	0.497 5	0.044 7

表7 参数H的特征值灵敏度

Tab. 7 Eigenvalue sensitivity of parameter H

参数 p(H)	阻尼比ζ	∂ζ/∂p	振荡频率 f	∂f/∂p
0.30	-0.005 6	-0.005 7	0.490 5	0.019 4
0.74	-0.017 6	-0.004 5	0.493 8	0.002 4
1.00	-0.022 6	-0.003 3	0.493 9	-0.000 8
1.30	-0.026 7	-0.002 2	0.493 6	-0.001 9
1.50	-0.028 7	-0.001 7	0.493 2	-0.002 1

表8 参数A的特征值灵敏度

Tab. 8 Eigenvalue sensitivity of parameter A

参数 p(A)	阻尼比ζ	∂ζ/∂p	振荡频率 f	∂f/∂p
0.3	-0.017 4	0.000 3	0.496 7	-0.005 7
0.5	-0.017 2	0.000 1	0.495 8	-0.005 4
0.7	-0.017 3	-0.000 1	0.494 9	-0.005 1
1.0	-0.017 6	-0.000 3	0.493 8	-0.004 5

表 9 参数 B 的特征值灵敏度
Tab. 9 Eigenvalue sensitivity of parameter B

参数 $p(B)$	阻尼比 ζ	$\partial\zeta/\partial p$	振荡频率 f	$\partial f/\partial p$
0.0	-0.017 6	-0.000 2	0.493 8	-0.002 5
0.2	-0.017 8	-0.000 2	0.493 4	-0.002 4
0.4	-0.020 0	-0.000 2	0.490 0	-0.002 3
0.6	-0.020 0	-0.000 2	0.490 0	-0.002 2
0.8	-0.018 5	-0.000 3	0.492 3	-0.002 1
1.0	-0.018 7	-0.000 3	0.492 0	-0.001 9

4 结论

本文提出了运用特征值对模型参数的灵敏度以及阻尼比, 和振荡频率对模型参数灵敏度分析负荷模型不确定性对系统阻尼影响的方法, 推导了相应的灵敏度计算公式。该方法避开了运用阻尼转矩法分析多机系统的阻尼情况这一困难, 解决了负荷模型参数在其不确定性范围内变化时是否影响以及如何影响系统阻尼这一问题, 并将影响因素定位在模型参数这一层面上, 具有一定工程实际意义。

参考文献

- [1] 薛禹胜, 郝思鹏, 刘俊勇, 等. 关于低频振荡分析方法的评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 1-8.
Xue Yusheng, Hao Sipeng, Liu Junyong, et al. A review of analysis methods for low-frequency oscillations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 1-8(in Chinese).
- [2] 马进, 贺仁睦, 王景钢, 等. 综合负荷模型参数的简化辨识策略[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 28-34.
Ma Jin, He Renmu, Wang Jinggang, et al. Simplified identification strategy for composite load model parameters[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 28-34(in Chinese).
- [3] 汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 等. 负荷建模的基本原则和方法[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 1-5.
Tang Yong, Zhang Hongbin, Hou Junxian, et al. Study on essential principle and methods for load modeling[J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 1-5(in Chinese).
- [4] 张东霞, 汤涌, 张红斌, 等. 负荷模型的应用与研究调查报告[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 16-23.
Zhang Dongxia, Tang Yong, Zhang Hongbin, et al. A survey paper of application and research of power system load model in power utilities[J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 16-23(in Chinese).
- [5] 贺仁睦, 徐衍会, 马进, 等. 人工三相短路试验数据验证的负荷实测建模方法[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 59-64.
He Renmu, Xu Yanhui, Ma Jin, et al. Measurement-based load modeling proved by the data recorded during artificial three phases ground tests in the power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 59-64(in Chinese).
- [6] Kosterev D N, Taylor C W, Mittelstadt W A. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [7] Milanovicj V, Hiskensi A. Effects of load dynamics on power system damping[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 1022-1028.
- [8] Wenshiow K. The effect of load models on unstable low-frequency oscillation damping in taipower system experience W/WO power system stabilizers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3): 463-472.
- [9] 云雷, 刘涤尘, 张琳, 等. 负荷特性对跨区大电网低频振荡的影响研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 41-45.
Yun Lei, Liu Dichen, Zhang Lin, et al. Influence of load characteristics on low frequency oscillation in cross-regional power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 41-45(in Chinese).
- [10] 杨艳, 赵书强, 朱洪波. 计及负荷特性的电力系统低频振荡分析[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(1): 34-36.
Yang Yan, Zhao Shuqiang, Zhu Hongbo. Analysis of low frequency oscillation in power system considering load characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(1): 34-36(in Chinese).
- [11] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1993: 714-715.
- [12] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 257-258.
- [13] 刘涛, 宋新立, 汤涌, 等. 特征值灵敏度方法及其在电力系统小干扰稳定分析中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 82-87.
Liu Tao, Song Xinli, Tang Yong, et al. Eigenvalue sensitivity and its application in power system small signal stability[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 82-87(in Chinese).
- [14] 刘晓明, 吕世荣, 郭强, 等. 特征值对运行方式灵敏度的计算[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(12): 9-12.
Liu Xiaopeng, Lü Shirong, Guo Qiang, et al. Eigenvalue sensitivity against operating condition in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(12): 9-12(in Chinese).
- [15] 马林, 廖培金, 彭书涛. 小干扰稳定中特征值对运行参数的灵敏度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 31-35.
Ma Lin, Liao Peijin, Peng Shutao. Eigenvalue sensitivity with respect to operating parameters in small signal stability analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(4): 31-35(in Chinese).
- [16] He Renmu, Ma Jin, Hill D J. Composite load modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 663-672.
- [17] 徐昊, 马进, 付红军, 等. 负荷模型不确定性对多机系统小扰动稳定的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 22-25.
Xu Hao, Ma Jin, Fu Hongjun, et al. Analysis of effects of load model uncertainty on small signal stability of multi-machine system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 22-25(in Chinese).



马进

收稿日期: 2011-01-08.

作者简介:

马进(1975), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为负荷建模、电力系统动态分析, E-mail: jinma@ncepu.edu.cn;

徐昊(1986), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统动态分析, E-mail: 584704486@qq.com.

(责任编辑 王晔)