基于二阶摄动理论的不确定系统小干扰稳定分析方法

静,彭明法,王 彤,杨奇逊 马

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:针对电力系统多运行参数波动较大的情况下,振荡模式的阻尼比以及系统的运行状态难以在区间模 型下连续描述的问题,提出一种基于二阶摄动理论的小干扰稳定分析方法。建立不确定信息下获取系统振荡 模式分布情况的复模态二阶摄动模型,在此基础上,连续描述运行状态在不确定变化区间内振荡模式阻尼比 的变化轨迹。IEEE 16 机 68 节点系统仿真结果表明:不同运行参数在区间范围内变化时,对同一振荡模式的 阻尼比影响程度不同:同一运行参数在区间范围内变化时,对不同振荡模式的阻尼比影响不同。在多运行参 数波动较大的情况下,该方法也能较准确地评估系统的小干扰稳定情况。

关键词:低频振荡:二阶摄动理论:区间分布:阻尼比:电力系统:稳定性 中图分类号: TM 712 文献标识码 · A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.020

0 引言

随着电网规模的不断扩大及运行方式的灵活多 变,电力系统的低频振荡问题愈加突出[1-4]。目前,低 频振荡分析方法主要分为轨迹分析法模型分析法。 后者又可分为确定性模型法和不确定性模型法。长 期以来,电力部门在规划和运行中都采用确定性模型 法分析系统稳定性,而忽略了网络拓扑、模型、参数 和运行工况等不确定因素的影响,为此,不确定性模 型法通过建立不确定因素与状态变量,以及状态变 量与特征根之间的关系,利用不确定性特征根反映 不确定因素对系统稳定性的影响,更符合实际情 况。不确定性模型法主要包括概率模型[5-6]和区间模 型[7-8]2种。与概率模型相比,区间模型所需的统计 学参数较少且易于获取,目前,对该方法的研究主要 集中在分析单一运行参数的不确定性变化、区间限 值处对应的系统运行状态、运行参数微小波动情况 下评估系统的小干扰稳定性等方面[9-10]。对如何解 决多运行参数波动较大情况下,连续描述区间内及限 值处对应的系统运行状态等问题亟待进一步研究。

收稿日期:2012-03-23;修回日期:2013-05-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012-CB215200):国家自然科学基金资助项目(51277193,50907021, 50837002);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(11MG01); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目([2011]1139);河 北自然科学基金资助项目(E2012502034);中国电机工程学会 电力青年科技创新项目([2012]46);河北省电力公司科技项目 (KJ[2012]278–280)

Project supported by the National Key Basic Research Program of China (973 Program) (2012 CB215200), the National Natural Science Foundation of China (51277193,50907021, 50837002), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (11MG01), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry ([2011]1139), Hebei Natural Science Foundation (E201250-2034), Electric Power Youth Science and Technology Creativity Foundation of CSEE([2012]46) and Science Foundation of Hebei Electric Power Corporation(KJ[2012]278-280)

围绕这些问题,本文提出了一种考虑多运行参数 不确定性的低频振荡分析方法。首先,建立不确定信 息下获取系统振荡模式分布情况的复模态二阶摄动 模型,在此基础上,连续描述运行状态在不确定变化 区间内振荡模式阻尼比的变化轨迹。IEEE 16 机 68 节点系统仿真结果验证了该方法的正确性和有效性。

基于二阶摄动理论的小干扰稳定分析原理 1

设系统运行参数 a 的不确定性用区间模型表示 为 $[a, \overline{a}]$ 。当 a 在区间内变化时,状态矩阵 A 将发生 如下改变.

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{A}_0(\boldsymbol{a}^c) + \Delta \boldsymbol{A} \tag{1}$$

其中, $a^{c}=(a+a)/2$, $A_{0}(a^{c})$ 为状态矩阵的确定性部分; ΔA 为状态矩阵的不确定部分。矩阵 A 中元素的具体 推导详见文献[11]。

考虑区间不确定性的系统特征解问题可描 述为:

$$(A_0 + \Delta A)(\varphi_{i0} + \Delta \varphi_i) = (\lambda_{i0} + \Delta \lambda_i)(\varphi_{i0} + \Delta \varphi_i)$$
(2)
由矩阵摄动理论^[12-14],式(2)的特征解可表示为:

$$\lambda_i = \lambda_{i0} + \lambda_{i1} + \lambda_{i2} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\varphi}_i = \boldsymbol{\varphi}_{i0} + \boldsymbol{\varphi}_{i1} + \boldsymbol{\varphi}_{i2} \tag{4}$$

其中, λ_i, φ_i 分别为系统的特征值、右特征向量; $\lambda_{i0}, \varphi_{i0}$ 分别为系统确定性部分的特征值、右特征向量; λ_{i1} 、 λ_{i2} 分别为特征值的一阶和二阶摄动值; $oldsymbol{arphi}_{\mathrm{ll}},o$ 特征向量的一阶和二阶摄动值。

将式(3)、式(4)代入式(2),且忽略三阶及三阶以 上无穷小量,可得:

$$o^{0}: A_{0} \varphi_{i0} = \lambda_{i0} \varphi_{i0} \tag{5}$$

$$o^{1}: \mathbf{A}_{0} \boldsymbol{\varphi}_{i1} + \Delta \mathbf{A} \boldsymbol{\varphi}_{i0} = \lambda_{i0} \boldsymbol{\varphi}_{i1} + \lambda_{i1} \boldsymbol{\varphi}_{i0}$$

$$(6)$$

$$o^{2}: \mathbf{A}_{0}\boldsymbol{\varphi}_{i2} + \Delta \mathbf{A}\boldsymbol{\varphi}_{i1} = \lambda_{i0}\boldsymbol{\varphi}_{i2} + \lambda_{i1}\boldsymbol{\varphi}_{i1} + \lambda_{i2}\boldsymbol{\varphi}_{i0}$$
(7)

左特征向量 ψ_i 与右特征向量 φ_i 经过规范化后

(8)

满足下列关系式:

$$\boldsymbol{\psi}_{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}_{i}=1 \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\psi}_{i0}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{A}_{0} \boldsymbol{\varphi}_{j0} = \delta_{ij} \lambda_{j0} \tag{9}$$

$$\delta_{ij} = \boldsymbol{\psi}_i^{\mathrm{I}} \boldsymbol{\varphi}_j \tag{10}$$

当 i=j时, $\delta_{ij}=1$,当 $i\neq j$ 时, $\delta_{ij}=0_{\circ}$

根据二项式原理,特征向量一阶摄动值 φ_{i1} 和二 阶摄动值 φ_{i2} 可以通过确定性部分的右特征向量 φ_{i0} 表示:

$$\boldsymbol{\varphi}_{i1} = \sum_{j=1}^{n} c_{j1} \boldsymbol{\varphi}_{j0} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{\varphi}_{i2} = \sum_{j=1}^{n} c_{j2} \boldsymbol{\varphi}_{j0} \tag{12}$$

其中,n为状态矩阵的阶数。

将式(11)代入式(6),式(12)代入式(7),且式 (6)与式(7)两边同时左乘 ψ[™]₀,再根据左右特征向量 的正交性可得:

$$c_{j1}\boldsymbol{\lambda}_{j0} + \boldsymbol{\psi}_{j0}^{\mathrm{T}} \Delta \boldsymbol{A} \boldsymbol{\varphi}_{i0} = c_{j1}\boldsymbol{\lambda}_{i0} + \boldsymbol{\lambda}_{i1}\boldsymbol{\delta}_{ij}$$
(13)

$$_{j2}(\boldsymbol{\lambda}_{i0}-\boldsymbol{\lambda}_{j0})+\boldsymbol{\lambda}_{i2}\boldsymbol{\delta}_{ij}=\boldsymbol{\psi}_{j0}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{A}\boldsymbol{\varphi}_{i1}-\boldsymbol{\lambda}_{i1}\boldsymbol{\psi}_{j0}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}_{i1} \qquad (14)$$

$$\lambda_{i1} = \boldsymbol{\psi}_{i0}^{\mathrm{T}} \Delta \boldsymbol{A} \boldsymbol{\varphi}_{i0} \tag{15}$$

$$\sum_{i=1}^{2n} \frac{\boldsymbol{\psi}_{i0}^{\mathrm{T}} \Delta \boldsymbol{A} \boldsymbol{\varphi}_{i0} \boldsymbol{\varphi}_{i0}}{\boldsymbol{\lambda}_{i0} - \boldsymbol{\lambda}_{i0}}$$
(16)

将式(15)和式(16)代入式(3),可计算出系统参数变化后的特征值二阶近似值:

$$\lambda_i \approx \lambda_{i0} + \lambda_{i1} + \lambda_{i2} \tag{17}$$

2 应用算例

λ

以 IEEE 16 机 68 节点^[15]的新英格兰—纽约互 联系统为例,如图 1 所示,该系统可分为五大区域。 发电机采用六阶详细模型,励磁采用 IEEE-DC1 型励 磁,负荷模型采用 WECC 负荷模型,有功负荷中包 含 80%的恒有功负荷,20%的电动机负荷,无功负 荷中包含 80%的恒无功阻抗负荷,20%的电动机负 荷。矩阵 *A* 的具体形成详见软件 Power System Toolbox,系统在区间中值处的低频振荡主导模式见 表 1。利用 MATLAB 7.6.0 进行摄动分析。

考虑系统运行方式和结构参数的区间不确定 性,其中系统运行方式的不确定性以 16 机机端电压 U_{G16}和有功功率 P_{G16},以及 37 节点负荷的有功功率 P_L 为例进行分析;而系统结构参数的不确定性则采用 15 机的惯性时间常数 M₁₅和暂态电抗 x'_{d15}进行考察。 不确定性区间分布均为其中值的±20%。计算结果 表明,平均每次摄动所需的时间为 0.03 s,而利用 QR 计算方法的时间为 0.04 s,并且随着矩阵维数的上升, 利用摄动方法计算特征值的效率越高。



图 1 IEEE 16 机 68 节点系统接线图 Fig.1 Connection diagram of IEEE 16-generator 68-bus system

表1 低频振荡主导模式

Tab.1 Dominant mode of low-frequency oscillation

模式	特征根	频率/Hz	阻尼比/%
模式1	-0.0047±j2.4590	0.3914	1.90
模式2	-0.0702±j3.1938	0.5083	2.25
模式3	-0.1275±j3.9770	0.6330	3.20
模式4	-0.1676±j4.9708	0.7911	3.37

2.1 考虑系统运行方式不确定性的阻尼比区间分布

系统运行方式在区间范围内变化时,相应的区间 振荡模式阻尼比区间如表 2 所示,表中 U_{CI6}、P_{CI6}、P_L 取值范围分别为 0.8~1.2 p.u.、32~46 MW、48~72 MW。 由表 2 可知,不确定参数 U_{CI6} 和 P_{CI6} 对模式 1 阻尼比 的影响程度最大;对模式 2 阻尼比的影响程度次 之;对模式 3 和模式 4 阻尼比的影响较小。P_L 对模式 3 阻尼比的影响程度最大,而对模式 1、模式 2 以及 模式 4 的阻尼比几乎没有影响。

表 2 系统运行方式不确定时阻尼比区间分布 Tab.2 Interval of damping ratio under uncertainty of operation mode

档式	阻尼比		
快八	$U_{ m G16}$	$P_{ m G16}$	$P_{\rm L}$
模式 1	0.0013~0.0506	$0.0021 \sim 0.0817$	$-0.0003 \sim 0.0048$
模式 2	0.0186~0.0313	$0.0215 \sim 0.0265$	0.022~0.022
模式 3	0.0316~0.0324	$0.0297 \sim 0.0322$	$0.0293 \sim 0.0352$
模式 4	$0.0327 \sim 0.0349$	$0.0327 \sim 0.0343$	0.0337~0.0337

考虑到模式1参与振荡的机组最多,是典型的 区间振荡模式,因此本文以模式1为例,分析不同运 行方式在不确定区间内变化时,其阻尼比的变化趋 势,如图2-4所示,图2中U_{C16}为标幺值,后同。



由图 2—4 可知,16 机机端电压升高时,模式1阻 尼比急剧减小,当减至最小值后又缓慢增加;16 机 有功增大时,模式1的阻尼比缓慢减小,在减至最小值 后又迅速增加;37 节点负荷有功增加时,模式1的阻 尼比单调递减,逐渐由正阻尼模式变为负阻尼模式。

由上面分析可知,不同运行参数在区间范围内变 化时,对振荡模式的阻尼比影响程度不同。为了更全 面地描述不同模式阻尼比与系统运行状态的对应关 系,以 U_{G16}在不确定区间内变化为例,分析各模式的 阻尼比随其变化规律。如图 5 所示,模式 1 的阻尼比 随 U_{G16}的增大而迅速减小,当减小至最小值后,又随



图 5 区间模式阻尼比随 $U_{\rm G16}$ 变化轨迹 Fig.5 Damping ratio of inter-area mode vs. $U_{\rm G16}$

U_{C16}的增大而逐渐增加;模式 2 的阻尼比与模式 1 变 化规律相同;模式 3 的阻尼比随 U_{C16}的增大而逐渐增 加,但达到最大值后,又随 U_{C16}的增加而逐渐减小;模 式 4 的阻尼比则随着 U_{C16}的增大呈单调递增的趋势。 同理,也可分析当 P_{C16}、P_L在不确定区间内变化时,各 模式的阻尼比随其变化的曲线,本文不再赘述。

由图 2—5 还可以看出,在运行方式变化区间比 较大的情况下,利用二阶摄动理论得到的阻尼比变化 曲线与真实阻尼比变化曲线极为接近,由此验证了本 方法的准确性和有效性。

2.2 考虑系统结构参数不确定性的阻尼比区间分布

系统结构参数在区间范围内变化时,相应的区间 振荡模式阻尼比区间如表 3 所示,表中 M₁₅、x'_{d15} 取值 范围分别为 240~360 s、0.002 28~0.003 42 p.u.。由 表 3 可知,不确定参数 M₁₅ 对模式 4 的阻尼比影响程度 最大,对模式 1 的阻尼比影响程度次之,对模式 2 和 模式 3 的阻尼比几乎无影响。同时,不确定参数 x'_{d15} 对各模式的阻尼比几乎无影响。

表 3 系统结构参数不确定时区间阻尼比区间 Tab.3 Interval of damping ratio of inter-area mode

under uncertainty of system structural parameters

档式	阻尼比	
快八	M ₁₅	x'_{d15}
模式1	0.0012~0.0030	0.0019~0.0020
模式 2	0.0218~0.0221	0.0220~0.0220
模式 3	0.0320~0.0321	0.0320~0.0320
模式 4	0.0312~0.0355	0.0336~0.0338

考虑到结构参数 M_{15} 和 x'_{d15} 变化时,对模式 4 阻尼 比的影响程度最大,因此本文以模式 4 为例,分析结 构参数在不确定区间内变化时,其阻尼比的变化趋势, 如图 6、7 所示,图 7 中 x'_{d15} 为标幺值。由这 2 幅图可 知,当 M_{15} 增大时,模式 4 的阻尼比单调增加;但 x'_{d15} 增大时,模式 4 的阻尼比虽然有增加的趋势,但其增 加程度甚小,几乎可以忽略不计。

由以上分析可知,不同结构参数在区间范围内变 化时,对振荡模式的阻尼比影响程度各异。为了更全 面地揭示不同模式阻尼比与系统结构参数间的关系, 以 *M*₁₅ 在不确定区间内变化为例,分析各模式的阻尼 比随其变化规律。如图 8 所示,模式 1 的阻尼比随 *M*₁₅ 的增加而逐渐减小,模式 2、3 的阻尼比随 *M*₁₅ 的



Fig.6 Damping ratio of mode 4 vs. M_{15}



增大几乎不变化,而模式4的阻尼比则随*M*₁₅的增大 而增大。同理,还可分析当*x'*₄₅在不确定区间内变化 时,各模式的阻尼比随其变化的曲线,在此不再详述。

由图 6—8 还可以看出,在结构参数变化明显的 情况下,利用二阶摄动理论得到的阻尼比变化曲线准 确度极高,符合真实情况,由此进一步验证了本方法 的有效性和可行性。

3 结论

120

本文提出一种基于二阶摄动理论和区间模型分 析低频振荡模式及其阻尼比的方法。首先,建立了不 确定信息下获取系统振荡模式分布情况的复模态二 阶摄动模型。然后,连续描述运行状态在不确定变化 区间内,振荡模式阻尼比的变化轨迹。IEEE 16 机 68 节点系统的仿真结果表明:一方面不同运行参数在区 间范围内变化时,对振荡模式的阻尼比影响程度不同; 另一方面,同一运行参数在区间范围内变化时,对不 同振荡模式的阻尼比影响各异。同时,当系统中不 确定参数发生较大变化时,该方法仍能较准确地评估 系统的小干扰稳定情况,并可为运行人员提供更加全 面的信息,以改善关键振荡模式的阻尼。

参考文献:

- [1] 梅生伟,申铁龙,刘康志.现代鲁棒控制理论与应用[M].北京:清
 华大学出版社,2008:68-90.
- [2] 余贻鑫,李鹏.大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J].中国电机工程学报,2005,25(11):6-11.

YU Yixin,LI Peng. The impact of weak internection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(11):6-11.

[3] 朱方,赵红光,刘增煌,等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性

的影响[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):1-7.

ZHU Fang, ZHAO Hongguang, LIU Zenghuang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1):1-7.

- [4] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill, 1994:699-822.
- [5] CHUNG C Y,WANG K W,TSE C T,et al. Power-System Stabilizer(PSS) design by Probabilistic Sensitivity Indexes(PSIs)[J]. IEEE Trans on Power Systems,2002,17(3):688-693.
- [6] GHASEMI H,CANIZARES C,MOSHREF A. Oscillatory stability limit prediction using stochastic subspace identification[J]. IEEE Trans on Power Systems,2006,21(2):736-745.
- [7] MOORE R E. Interval analysis[M]. New York, USA: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1966:1-27.
- [8] CHEN S H,QIU Z P. A new method for computing the upper and lower bounds on frequencies of structures with interval parameters[J]. Mechanics Research Communications, 1994, 21(6): 583-592.
- [9] 邢洁,陈陈,王杰. 区间不确定信息下小干扰稳定分析方法[J]. 电 力系统自动化,2010,34(6):12-18. XING Jie,CHEN Chen,WANG Jie. A small-signal stability analysis method under interval uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(6):12-18.
- [10] 赵书强,陈慷,马燕峰,等.密集型固有振荡模式电力系统的模态 分析[J].电力系统自动化,2011,35(21):6-13.
 ZHAO Shuqiang,CHEN Kang,MA Yanfeng,et al. Modal analysis of electric power system with close oscillation modes[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(21):6-13.
- [11] 倪以信,陈寿孙. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大 学出版社,2008:262-268.
- [12] 张小明,陈宇东,陈塑寰,等. 不确定参数闭环控制系统特征值的 区间分析[J]. 固体力学学报,2005,25(2):182-186.
 ZHANG Xiaoming,CHEN Yudong,CHEN Suhuan, et al. Interval eigenvalues of closed-loop systems of uncertain structures [J]. Acta Mechanica Solida Sinica,2005,25(2):182-186.
- [13] CHEN Suhuan. Matrix perturbation theory structural dynamic design[M]. Beijing, China: Sciences Press, 2007:36-94.

 [14] 王世鹏,陈塑寰.不确定性闭环系统特征上下界的二阶摄动法[J]. 吉林大学学报,2006,36(3):56-58.
 WANG Shipeng,CHEN Suhuan. Upper and lower bounds of eigenvalues of uncertain closed-loop systems with second-order perturbation[J]. Journal of Jilin University,2006,36(3):56-58.

[15] ROGERS G. Power system oscillations [M]. Boston, USA; Kluwer Academic Publishers, USA, 2000;7-10.

作者简介:

马 静(1981-),男,山西阳泉人,副教授,博士后,研究方

向为电力系统稳定与控制(E-mail:hdmajing@yahoo.com.cn);

彭明法(1989-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事 电力系统小干扰稳定性分析与控制等方面的研究:

王 形(1985-),女,河北石家庄人,博士研究生,主要从 事电力系统稳定与控制等方面的研究;

杨奇逊(1937-),男,上海人,中国工程院院士,博士研究 生导师,研究方向为电力系统保护与控制。

(下转第125页 continued on page 125)

电力自动化设备,2007,27(8):43-46.

HAO Wenbin,LI Qunzhan. Simulation of internal fault of three-phase five-leg transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8):43-46.

- [14] BARBISIO E,FIORILLO F,RAGUSA C. Predicting loss in magnetic steels under arbitrary induction waveform and with minor hysteresis loops[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2004, 40(4): 1810-1819.
- [15] 陈伟根,苏小平,孙才新,等. 基于有限体积法的油浸式变压器绕组温度分布计算[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):23-27.
 CHEN Weigen,SU Xiaoping,SUN Caixin,et al. Temperature distribution calculation based on FVM for oil-immersed power transformer windings [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):23-27.
- [16] MORK B A, ISHCHENKO D, GONZALEZ F, et al. Parameter esti-

mation methods for five-limb magnetic core model [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(4); 2025-2032.

[17] MARK B A,GONZALEZ F,ISHCHENKO D,et al. Hybrid transformer model for transient simulation-part I:development and parameters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 248-255.

作者简介:



董 霞(1974-),女,山东济南人,博士 研究生,从事变压器直流偏磁的研究(E-mail: dongxia6078@163.com);

刘志珍(1967-),男,山东济南人,教授, 博士研究生导师,从事电机、变压器等的电磁 场数值计算及优化设计方面的研究。

Simulative analysis of three-phase transformer with DC bias

DONG Xia, LIU Zhizhen

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: An electric circuit-magnetic circuit coupling model is built for three-phase three/five-legged transformer with DC bias. The magnetic circuit model considers the eddy current loss of transformer, the topology of magnetic core and the saturation characteristic of core material. The magnetic circuit equations considering the magnetomotive force caused by eddy current are coupled with the electrical circuit equations and the nonlinear characteristic curve of core is combined to form the nonlinear equations, which are then solved for the simulative analysis of DC bias characteristics for three-phase three/five-legged transformer. Simulative results verify that, the proposed model can correctly analyze the DC bias phenomenon of three-phase transformer.

Key words: electric transformers; DC bias; saturation characteristic; eddy currents; losses; models

(上接第 120 页 continued from page 120)

Small signal stability analysis based on second order perturbation theory for uncertain power system

MA Jing, PENG Mingfa, WANG Tong, YANG Qixun

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: When multiple operating parameters of power system vary severely, it is difficult to continuously describe the damping ratio of oscillation mode and system operational states by interval model, for which, a method of small signal stability analysis based on second order perturbation theory is proposed. The complex second order perturbation model of oscillation modes under uncertainties is built, based on which, the variation trajectory of damping ratio is continuously described when the operational state locates in the uncertainty interval. Simulative results for IEEE 16-generator 68-bus system show that, different operating parameters have different impacts on the damping ratio of a particular oscillation mode when they vary in the interval, while a particular operating parameter has different impacts on the damping ratio of different oscillation modes when it varies in the interval. The proposed method can accurately evaluate the small signal stability when multiple operating parameters fluctuate greatly.

Key words: low-frequency oscillation; second order perturbation; interval distribution; damping ratio; electric power systems; stability