

基于特征值分析法的 PSS 最佳安装地点的确定

徐光虎, 苏寅生, 孙衢, 陈陈

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 介绍了电力系统低频振荡的特征值分析方法, 并采用特征值分析法所得出的结果——参与因子来选择最佳的电力系统稳定器 (PSS) 安装地点, 以提高弱振荡模式的阻尼。采用发电机的转子角速度对弱振荡模式的参与因子作为指标, 选择最佳的 PSS 安装地点。通过对一个较大规模的电力系统进行实例分析, 说明在采用此方法所确定的最佳安装地点上安装 PSS, 可对相应振荡模式的阻尼起到很好的改善作用。

关键词: 低频振荡; 特征值分析; 电力系统稳定器

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)08-0001-04

0 引言

随着我国电力系统的发展, 西电东送、北电南送战略的实施, 我国大区电网之间的互联已经进入了规划和实施阶段。由于电网规模的扩大, 电力系统的低频振荡问题也随之凸现, 特别是通过交流输电线互联的系统, 由于送电距离长, 而联络线又相对较弱, 很容易由此引发低频振荡。如果没有足够的阻尼, 低频振荡发生后将长时间不能平息, 以至于引起并联运行系统失步甚至解列, 因此, 必须保证互联系统中各个低频振荡模式都有足够高的阻尼。

目前, 采用在特定机组上安装 PSS 仍然是抑止低频振荡的经济有效的方法。近年来, 人们在 PSS 参数配置和优化方面做了大量的工作, 在这方面有大量的文献。然而, 在选择合适的安装地点方面, 国内的工作仍然做得不够, 也少有这方面的文献发表。一方面是低频振荡问题还没有得到足够的重视, 另一方面是缺少强有力的分析工具。随着线性系统理论、电力系统建模方法以及数字计算方法的发展, 使得采用特征值分析法对大型电力系统进行小干扰分析成为可能, 同时, 也为系统地研究控制器的安装地点及其参数配置成为可能。在采用特征值分析进行 PSS 安装地点确定的方法中, 最早是采用右特征向量法^[1], 但此方法在系统中的机组容量相差较大的情况下得出的结果会有很大的偏差。后来又发展了此方法, 采用加权了发电机转动惯量的右特征向量作为 PSS 选址的标准。近年来, 由于线性系统理论的发展, 文献[2, 3]提出了采用参与因子 (Participation factors) 进行 PSS 选址。文献[4]提出用传递函数留数 (Transfer function residues) 进行 PSS 和 SVC 的选址。文献[5]提出了一种通过对一个非线性目

标函数进行寻优从而获得最佳的 PSS 安装地点的方法, 但此方法采用经典模型对发电机进行建模, 无法表示发电机各个绕组及励磁系统的动态特性。同时, 此方法假设 PSS 的输入来自系统中的每台发电机, 而实际的 PSS 的输入只来自安装了 PSS 的发电机, 因此, 这个方法在实际应用中的有效性受到质疑。目前, 确定 PSS 的最佳安装地点的实用方法仍然是基于特征值分析法的参与因子法和传递函数留数法。

1 电力系统低频振荡的特征值分析法

1.1 电力系统的线性化表示

电力系统是一个包含了大量线性和非线性元件的大系统, 通常情况下, 可视其为非线性自治系统, 用一组微分方程和一组代数方程表示:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, z) \\ 0 = g(x, z) \end{cases} \quad (1)$$

其中: x 为 n 维状态向量, z 为代数变量组成的 m 维向量。

在初始运行点 (x_0, z_0) 附近对系统进行线性化, 得

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_A & J_B \\ J_C & J_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

消去其中的代数变量 z , 可得到系统的线性化状态方程:

$$\dot{x} = (J_A - J_B J_D^{-1} J_C) \cdot x = A \cdot x \quad (3)$$

A 为 $n \times n$ 维矩阵, n 是系统的阶数。以下分析中省去变量前面的符号“ \cdot ”。

对系统的状态矩阵 A 进行特征值分析, 可得到 A 的特征值以及对应于每个特征值的右、左特征向

量,它们之间满足如下关系:

$$A \cdot P_i = \lambda_i \cdot P_i \quad (4)$$

$$q_i^T \cdot A = \lambda_i \cdot q_i^T \quad (5)$$

$$q_i^T \cdot P_j = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

其中: p_i 和 q_i 分别为 A 的对应于特征值 λ_i 的右特征向量和左特征向量。 λ_i 可以是实数,也可以是复数,复数的特征值以共轭复数成对出现,共轭特征值对的右、左特征向量也分别互为共轭。由于对应于 A 的一个特征值的特征向量并非唯一,因此式(6)是通过规范化而得到的。在本文的后续部分,将继续采用这一规范化方法。

在初始状态 x_0 下求解式(3),可得:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n (q_j^T \cdot x_0) P_j \cdot e^{\lambda_j t} \quad (7)$$

其中: n 为系统的阶数。注意到式中 $q_j^T \cdot x_0$ 为标量。

1.2 特征值和特征向量的物理意义

共轭复数特征值对 $\lambda_k \pm j\omega_k$ 对应系统时域响应中的一个振荡模式,实数特征值 λ_l 对应时域响应中的一个单调模式。系统的响应为各个模式分量的响应的叠加。如果有任何的实数特征值或者复数特征值的实部大于零,表明系统不稳定。对于振荡模式, ω_k 是其振荡的角频率,定义其阻尼比^[6]:

$$\zeta = -\frac{\sigma_k}{\sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2}}$$

阻尼比是表征一个振荡模式的阻尼相对大小的指标,它表明了振荡次数和衰减程度的关系,阻尼比越大,衰减到稳态值所需要的振荡次数就越少。对于电力系统的低频振荡模式,一般要求其阻尼比大于3%。

右特征向量决定了其对应的模式分量在各个系统变量的相对活跃程度。它包含了模式的能观性信息,其元素反映了相应的系统变量在此模式上的分量的相对幅值大小及相角关系。它表明了其相应的模式在哪一个系统变量上更具有能观性,右特征向量也被称为模式(Mode shape)。

左特征向量和初始状态一起,决定了一个模式响应的强烈程度。左特征向量包含了模式的可控性信息,它表明了对哪一个系统变量进行调制,可获得对此模式的更好的控制效果。右特征向量包含能观性信息,左特征向量包含可控性信息这一结论,在式

(7)中可以大致看出。

2 运用参与因子进行 PSS 选址

2.1 参与因子的定义

对于第 i 个系统变量和第 j 个模式,相应的参与因子如下计算:

$$k_{ij} = p_{ij} \cdot q_{ij} \quad (9)$$

其中: p_{ij} 和 q_{ij} 分别为第 j 个特征值的右、左特征向量的第 i 个元素。注意到对于振荡模式, k_{ij} 可以是复数。

2.2 参与因子的物理意义及其性质

由于参与因子是右、左特征向量的对应元素的乘积,因此,它既包含了模式 j 在第 i 个系统变量 x_i 上的能观性信息,也包含了 x_i 对模式 j 的可控性信息。 k_{ij} 表明了当 x_i 被扰动到 1,而其他的变量不被扰动时, x_i 的响应模式 j 的分量幅值和相角。

由式(9)所定义的参与因子具有以下性质:

1) 对于一个系统变量,所有模式的参与因子的和为 1,即

$$\sum_{j=1}^n k_{ij} = 1 \quad (10)$$

2) 对于一个模式,所有系统变量在此模式上的参与因子和为 1,即

$$\sum_{i=1}^n k_{ij} = 1$$

3) k_{ij} 是特征值 λ_j 对于状态矩阵 A 的对角元素 a_{ii} 的灵敏度,即

$$k_{ij} = \frac{\partial \lambda_j}{\partial a_{ii}} \quad (12)$$

4) 参与因子是无量纲量,它与系统变量的单位无关。

参与因子既包含了能观性信息,又包含了可控性信息,如果 k_{ij} 相对较大,表明了模式 j 对系统变量的局部反馈反应灵敏,因此,它是确定与各个模式强相关的系统变量的方便途径,可通过参与因子的大小来确定阻尼控制器的合适安装地点。对于安装 PSS 以增强电力系统低频振荡模式的阻尼,可以采用发电机的角速度对于待改善的模式的参与因子作为指标,决定 PSS 的最佳安装地点。下面通过一个实际的算例来分析如何通过参与因子来配置 PSS,以提高系统低频振荡模式的阻尼。

3 算例分析

通过对一个相对较大的实际电力系统进行特征

值分析,找出系统中存在的弱阻尼低频振荡模式,并采用发电机的角速度对于待改善模式的参与因子作为指标,确定 PSS 的安装地点,同时给出加入 PSS 对相应模式的阻尼改善的效果。

所研究的系统为华中-川渝电网 2005 年丰大运行方式,系统中有 110 台机组,784 条母线,200 台变压器。在计算中,大部分的机组(104 台)都用详细模型(Park 模型)表示,小部分机组(6 台)由于容量很小,同时缺乏足够详细的数据,采用 E_q 恒定模型表示。整个计算过程采用上海交大电气工程系自行开发的 SSAP 软件包^[7]进行系统建模,并进行特征值、特征向量和参与因子的计算。

在不计及二滩机组 PSS 的作用的情况下,系统中存在的弱阻尼模式(阻尼比小于 0.03)如表 1(只列出小于 1 Hz 的振荡模式),由表 1 可以清楚地看到,模式 2 和模式 6 都和二滩机组强相关,它们与二滩机组的转子角速度的相关因子(即参与因子)分别达到 0.105 和 0.276。模式 2 的弱阻尼和模式 6 的负阻尼模式,如果不加以控制,系统将不可能在此运行方式下运行。

表 1 二滩机组的 PSS 不投入时,系统中的弱阻尼模式

Tab.1 Weak damping modes without PSS at Ertan generators

模式标号	频率 / Hz	阻尼比	最相关机组
1	0.940	0.017	丹江 2
2	0.752	0.012	二滩
3	0.740	-0.004	凤滩,三峡左
4	0.594	0.008	凤滩
5	0.552	0.013	万安
6	0.333	-0.093	二滩

表 2 为在二滩机组投入 PSS 后的特征值分析结果,表中模式 2 和模式 6 的阻尼比已经有了显著的提高,而对其他模式的阻尼变化很小,足以证明在二滩机组上安装的 PSS 对提高相关模式的阻尼所起的作用,同时也表明了参与因子确实包含了模式与系统状态变量的相关性信息,如果一台发电机的转子角速度与某一个模式的相关因子较大,说明在这台发电机上安装 PSS,可获得对这个模式较好的控制效果。

模式 3 和模式 4 都和凤滩机组强相关,在二滩机组安装了 PSS 的基础上,在凤滩机组上安装 PSS,安装后的分析结果如表 3 所示。从表中可以看出,在凤滩安装了 PSS 之后,模式 3 和模式 4 的阻尼都有了

相应的提高。同时,我们也注意到,模式 3 的阻尼还达不到要求,应该进一步加以控制。

表 2 计及二滩机组 PSS 作用时的计算结果

Tab.2 Calculated results with PSS at Ertan generators

模式标号	频率 / Hz	阻尼比	最相关机组
1	0.940	0.017	丹江 2
2	0.687	0.077	.....
3	0.740	0.002	凤滩,三峡左
4	0.593	0.008	凤滩
5	0.552	0.013	万安
6	0.257	0.179	.....

(注:对于阻尼比大于 0.03 的模式,没有列出其最相关机组)

表 3 二滩和凤滩机组安装了 PSS 后的计算结果

Tab.3 Calculated results with PSS at both Ertan and Fengtan generators

模式标号	频率 / Hz	阻尼比	最相关机组
1	0.940	0.017	丹江 2
2	0.686	0.076	.....
3	0.720	0.014	凤滩,三峡左
4	0.535	0.042	.....
5	0.553	0.014	万安
6	0.257	0.171	.....

最后,在丹江 2、三峡左、万安等机组上安装 PSS,得出的结果如表 4。从表中可见,在以上各台机组上安装了 PSS 后,原有的弱阻尼模式的阻尼都已经达到了要求的水平,可见根据参与因子所确定的 PSS 选址都是正确的。

表 4 在各相关机组安装 PSS 后的计算结果

Tab.4 Calculated results with PSS at the relevant generators

模式标号	频率 / Hz	阻尼比	最相关机组
1	0.925	0.056	.....
2	0.692	0.081	.....
3	0.735	0.125	.....
4	0.535	0.039	.....
5	0.497	0.037	.....
6	0.259	0.178	.....

4 结论

本文介绍了电力系统低频振荡的特征值分析方法,以及采用参与因子选择 PSS 的安装地点以增强系统中的关键模式的阻尼的方法。把参与因子的特征值分析结果的一部分经过特征值分析,就可以获得参与因子,并可作为选择 PSS 安装的指标,不需要额外的计算量。从算例分析中可以看出,采用关键模

式与发电机转子角速度的参与因子作为指标,选择 PSS 的安装地点,可以获得满意的效果。

参考文献:

- [1] de Mello F P, Nolan P J, Laskowski T F, et al. Coordinated Application of Stabilizers in Multi-machine Power System[J]. IEEE Trans on PAS, 1980, 99(3): 892-901.
- [2] Hsu Yuan-Yih, CHEN Chern-Lin. Identification of Optimum Location for Stabilizer Applications Using Participation Factors[J]. IEE Proc on Gener, Trans & Distrib 1987, 134(3):238-244.
- [3] Pagola FL, Perez-arriaga J, Verghese GC. On Sensitivities, Residues and Participations: Application to Oscillatory Stability Analysis and Control[J]. IEEE Trans on Power System, 1989, 4(1):278-285.
- [4] Martins N, Lima LT G. Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping Electromechanical Oscillation in Large Power System[J]. IEEE Trans on Power System, 1990, 5(4):1455-1469.

- [5] LU Jin, Chiang Hsiao-Dong, Thorp J S. Identification of Optimum Site for Power System Stabilizer Applications[J]. IEEE Trans on Power System, 1990, 5(4):1302-1308.
- [6] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [7] 励刚(LI Gang). 小干扰稳定性分析及面向对象软件包的开发研究 (Small Signal Stability Analysis and Object Oriented Software Developing, Doctoral Dissertation) [D]. 上海: 上海交通大学 (Shanghai: Shanghai Jiaotong University), 2000.

收稿日期: 2003-08-11

作者简介:

徐光虎(1974 -),男,博士研究生,研究方向为电力系统小信号稳定性分析与控制;

苏寅生(1977 -),男,硕士,研究方向为电力系统小信号稳定性分析和软件开发;

陈 陈(1938 -),女,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统的稳定性与控制、FACTS 理论及其应用。

Identification of PSS optimum location based on eigenvalue analysis method

XU Guang-hu, SU Yin-sheng, SUN Qu, CHEN Chen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper introduces the eigenvalue analysis method for the low frequency oscillation of power system. The participation factors from eigenvalue analysis are used to identify the optimum location for PSS to improve the damping of the weak oscillation mode. This paper takes the participation factors of rotor angle velocity for weak damping mode as the index to identify the optimum location for PSS. The performance of the proposed method is tested in a large-scale power system, and the result shows that, when PSS is located on the selected sites, the damping to the relevant modes can be improved significantly.

Key words: low frequency oscillation; eigenvalue analysis; power system stabilizer (PSS)

国家电网公司紧急通知:确保电网安全稳定运行

根据今年以来十分严峻的安全生产形势,国家电网公司有关部门日前发出紧急通知,要求所属单位,采取切实有效措施,加强安全生产管理,确保电网安全稳定运行。

统计显示,今年1~2月,由于部分基层企业现场安全管理较为薄弱,设备运行维护不到位,以及干旱少雨、火山多发、恶劣天气、外力破坏等因素的影响,造成一些性质严重的人身、电网、设备等事故明显增多,给电网安全稳定运行带来严重影响。

为此,国家电网公司生产部门在紧急通知中提出了七条具体要求。一是所属各单位要全面分析本网发生的各类事故,认真吸取事故教训,针对存在的问题认真制定并落实整改措施和安全生产的各项防范措施,坚决遏止各类事故的发生;二是切实加强了对人员安全生产的管理,加强反违章工作和防止误操作工作,深入开展危险源(点)预控和安全教育及技能培训工作,严防人身伤害事故和人身责任事故的发生;三是调度部门要针对春检工作相对集中,电网结构相对薄弱、运行操作比较集中,部分地区电煤供应紧张等特点,优化电网运行方式安排,做好事故预想,保障电网安全运行;四是要针对春季风大、雾多、干旱等不良天气影响设备安全运行的特点,加强对设备运行的巡视和维护,保证设备缺陷或安全隐患早发现、早消除;五是检修维护单位要切实落实各项安全措施,优化工作安排,严格执行标准,保证设备检修质量和工期,做到应修必修,修必修好,防止电网事故和设备事故发生;六是基建调试单位要严把安全生产和工程质量关,严格执行规程规定,防止调试漏项和将隐患遗留到生产运行环节;七是各级安监部门,要关口前移,重心下沉,加强对生产一线的安全监督检查和指导,坚决纠正各类违章行为,严防人身伤害事故、人员责任事故以及其他各类事故发生。