

电力系统低频振荡的类型判别研究与分析

周专¹, 常喜强², 张增强¹, 王衡², 张锋², 贡剑²

(1. 国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830016;

2. 国网新疆电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830006)

摘要: 随着区域电网互联、电网规模不断扩大和快速励磁系统的大量应用, 电力系统动态稳定性问题也越来越突出, 逐渐成为影响电网安全和限制输电功率极限的主要因素。由于动态元件的大量投入, 改变了系统动态调节性能, 若动态稳定性差将容易引发系统低频振荡。系统低频振荡会导致系统出现频率、电压、功率等电气量不同程度振荡的现象, 持续恶化的互相作用最终将导致系统失稳、解列, 形成大规模的停电事故。因此电力系统低频振荡问题越来越受到人们的关注, 而如何正确、快速判别振荡性质成为难于解决的问题。对负阻尼振荡和强迫振荡的特性进行研究, 提出了基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据, 以某电网低频振荡为实例加以验证, 表明所提出的研究方法能有效判断低频振荡类型。对分析实际运行中低频振荡现象以及有效抑制系统低频振荡具有重要的指导意义。

关键词: 低频振荡; 负阻尼振荡; 强迫振荡; 响应特性

Abstract: With the large applications of the regional power grid interconnection, grid expanding and fast excitation systems, the dynamic stability problems of power system are more prominent, and gradually become the main factor influencing the grid security and power limit. Since a large number of dynamic elements being put into operation, the dynamic regulation performance is changed, and the poor dynamic stability will likely lead to low-frequency oscillation. Low-frequency oscillation can cause the system to have the oscillations of frequency, voltage, power and other electrical quantities in different degrees, the deteriorating interaction will eventually lead to system instability and splitting which will form large-scale blackouts. Therefore, low-frequency oscillation problem is getting more and more attention, and how to determine the oscillation properties correctly and quickly becomes a difficult problem. Therefore, the characteristics of negative damping oscillation and forced oscillation are studied, the oscillation distinguishing criterion for envelope shape based on transient response in start-up phase are proposed. It is verified by taking the low-frequency oscillation of one grid as example, and it shows that the proposed method can effectively determine the type of low-frequency oscillations, which has an important guiding significance for analyzing low-frequency oscillation and suppressing low-frequency oscillation in actual operation.

Key words: low-frequency oscillation; negative damping oscillation; forced oscillation; response characteristics

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0001-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.001

0 引言

20世纪60年代美国西北电力系统与西南电力系统进行互联时, 发生了功率的增幅振荡, 最终破坏了大系统的并联运行。日本、欧洲等国也先后发生过低频振荡。在中国, 随着电网规模的日益扩大以及快速励磁装置使用的增加, 也出现过多次低频振荡事故。电力系统一旦发生低频振荡, 将严重威胁电网的安全稳定运行, 甚至可能诱发连锁反应, 造成

基金项目: 国家自然科学基金项目(51267017)

更严重的后果, 故低频振荡问题一直是电力系统安全稳定运行中备受关注的重要问题之一, 对低频振荡进行深入研究具有十分重要的意义^[1-3]。

系统低频振荡会导致系统出现频率、电压、功率等电气量不同程度振荡的现象, 持续恶化的互相作用最终将导致系统失稳、解列, 形成大规模的停电事故。随着区域电网互联、电网规模不断扩大和快速励磁系统的大量应用, 低频振荡出现的概率不断提高, 振荡类型越来越多, 且低频振荡扰动源定位越来越复杂, 加大了分析低频振荡原因及抑制低频振荡的难度^[4]。

因此对负阻尼振荡和强迫振荡的特性进行研究,提出了基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据,以某电网低频振荡为实例加以验证,表明所提出的研究方法能有效判断低频振荡类型。对分析实际运行中低频振荡现象以及有效抑制系统低频振荡具有重要的指导意义。

1 低频振荡概述

电力系统中发电机经输电线并列运行时,在扰动下会发生发电机转子间的相对摇摆,并在缺乏阻尼时引起持续振荡,此时,输电线上功率也会发生相应振荡。由于振荡频率很低,一般为0.2~2.5 Hz,故称为低频振荡。而随着联网规模的不断增大,低频振荡频率也随之降低至0.1 Hz,甚至更低。

根据系统振荡频率的不同范围,将低频振荡分为本地振荡模式和区间振荡模式两种类型。区域内振荡模式:涉及一个发电厂内的发电机组与电力系统其他部分之间的摇摆,其振荡频率一般为1~2 Hz。区域间振荡模式:系统中某一个区域内的多台发电机与另一区域内的多台发电机之间的相对摇摆。当系统表现为两群发电机之间振荡时,振荡频率大致在0.1~0.3 Hz之间,当系统表现为多群发电机之间的振荡时,振荡频率大致在0.4~0.7 Hz之间^[5-6]。

根据低频振荡性质主要分为两种:一种是负阻尼低频振荡,负阻尼振荡是逐渐增幅过程,若没有人干预,将持续保持增幅振荡,振荡的幅度越来越大,直到系统切机或失稳;另一种是强迫共振型的低频振荡,当扰动频率与系统自然振荡频率相同或接近时,产生共振,振荡振幅主要与扰动的幅度及系统阻尼水平有关,振荡过程中扰动源一直存在,振荡不会消失。

但由于两种振荡的表现形式很相似:

- 1) 振荡的起始阶段都表现为增幅振荡;
- 2) 增幅振荡都可能发展为等幅振荡。

这使得如何正确、快速判别振荡性质成为必须解决而又难于解决的问题。

2 两种低频振荡响应特性

2.1 负阻尼低频振荡的响应特性

• 2 •

发电机采用经典二阶模型(假定 E' 恒定)线性化的状态方程为

对于 N 维线性化系统状态方程:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x(t) \quad (1)$$

式中: Δx 为增量形式的系统状态变量; A 为系统状态矩阵。

对任一特征值 λ_i ,对非零向量 $\varphi_i \in C^{N \times 1}$ 和 $\psi_i \in C^{N \times 1} (i=1, 2, \dots, N)$ 满足方程

$$\begin{cases} A\varphi_i = \lambda_i \varphi_i \\ \psi_i^T A = \lambda_i \psi_i^T \end{cases} \quad (2)$$

则称 φ_i 和 ψ_i 分别为与矩阵 A 的特征值 λ_i 相对应的右、左特征向量^[7-8]。

为了方便、简明地表达系统振荡响应的特征,分别定义特征根对角矩阵 Λ 、右特征向量矩阵 φ 、左特征向量矩阵 ψ 如下:

$$\begin{cases} \Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\} \\ \varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N] \\ \psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]^T \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)可以看出,每个状态变量的变化率与所有的状态变量都线性相关。为了消去状态变量之间的耦合,引入新的状态变量 Z ,两种状态变量之间的模态坐标为

$$\Delta x = \varphi Z \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)中,可得

$$\dot{Z} = \varphi^{-1} A \varphi Z = \psi^T A \varphi Z = \Lambda Z \quad (5)$$

式(5)表示的 N 个解耦的一阶微分方程的解为

$$Z_i(t) = Z_i(0) e^{\lambda_i t} \quad (6)$$

由式(4)可得用 ψ_i 和 $\Delta x(0)$ 表示的 $Z_i(0)$,即

$$Z_i(0) = \psi_i^T \Delta x(0) e^{-\lambda_i t} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)中,可得

$$Z_i(t) = \psi_i^T \Delta x(0) e^{\lambda_i t} \quad (8)$$

将式(8)代入式(4)中,可得

$$\Delta x = \sum_{i=1}^N \varphi_i Z_i(t) = \sum_{i=1}^N \varphi_i \psi_i^T \Delta x(0) e^{\lambda_i t} \quad (9)$$

式(9)即为多机系统负阻尼振荡响应的解析表达式。

可以看出,负阻尼振荡模式的系统中,相对振荡的机组,功角与转速将同时发生变化,不能通过振荡先后来识别振荡源。在多机系统中,右特征向量各分量的模值反映了相应机组参与振荡模式的强弱程度,分量的模值越大,该机组的振荡就越强;右特征向量各分量的相位反映了机组对该振荡模式的同调

程度,负阻尼振荡的机组之间的相对相位将在振荡全程保持不变。

2.2 强迫低频振荡的响应特性

在包含 N 台发电机的多机系统中,由于主要关注振荡频率在 $0.1 \sim 2.5$ Hz 之间的机电模式,而它们主要由转子运动方程决定,所以可以只考虑转子运动方程。发电机采用经典二阶模型(假定 E' 恒定)其线性化状态方程为

$$\Delta \dot{x} = Ax(t) + B(t) \quad (10)$$

式中: $x(t)$ 为系统状态; A 为系统状态矩阵; $B(t)$ 为扰动向量^[9]。

假定初始时刻为 t_0 ,系统的初始状态为 $\Delta x(t_0)$ 。利用矩阵微分方程的初值问题定理,式(10)解的形式如式(11)所示,其中 $\Delta x_1(t)$ 表示系统的零输入(自由)响应, $\Delta x_2(t)$ 表示系统的零状态(强迫)响应。

$$\begin{aligned} \Delta x(t) &= \Delta x_1(t) + \Delta x_2(t) \\ &= e^{A(t-t_0)} \Delta x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-A(\tau-t)} B(\tau) d\tau \quad (11) \end{aligned}$$

假设系统的初始状态为 $\Delta x(t_0)$ 为 0,利用积分公式:

$$\int e^{\alpha x} \sin \beta x dx = \frac{e^{\alpha x} (\alpha \sin \beta x - \beta \cos \beta x)}{\alpha^2 + \beta^2} \quad (12)$$

另外,假设 $t_0=0$ 定义第 r 阶振荡模式的固有频率为 $\omega_{nr} = |\lambda_r|$, 阻尼为 $-\zeta_r \omega_{nr}$, 振荡频率 $\omega_{dr} = \sqrt{1 - \zeta_r^2} \omega_{nr}$, $\lambda_r = \omega_{nr} \theta_r$, $\theta_r = \alpha \cos(-\zeta_r)$; 设 $\varphi_{ir} = |\varphi_{ir}|$, $\gamma_{ir} \psi_{ri} = |\psi_{ri}| \sigma_{ri}$, $\psi_{ri} = |\psi_{ri}| \sigma_{ri}$, $\Delta x_2(t)$ 第 i 个分量为

$$\begin{aligned} \Delta x_{2i}(t) &= \sum_{r=1}^{n-1} \sum_{l=1}^m \frac{\Delta P_{ml} B_{1il}^r \sin(\omega_l t + \varphi_{il}^r)}{(\omega_{nr}^2 - \omega_l^2) + 4\xi_r^2 \omega_{nr}^2 \omega_l^2} \\ &+ \frac{ce^{-\xi_r \omega_{nr} t} \Delta P_{ml}}{(\omega_{nr}^2 - \omega_l^2) + 4\xi_r^2 \omega_{nr}^2 \omega_l^2} \quad (13) \end{aligned}$$

于是,可总结得到多机系统强迫功率振荡响应的特征如下:

1) 强迫振荡响应是系统受到持续的周期性扰动后的响应。如果系统初始状态的变化量为 0,该响应为系统的零状态响应;若系统的初始状态的变化量不为 0,则响应中还包含系统的零输入响应成分;

2) 多机系统强迫振荡的零状态响应是在所有扰动源的共同作用下、各阶振荡模式响应的叠加,由外施扰动源决定的强制(稳态)分量和由系统各阶振荡模式决定的自由(瞬态)分量组成;

3) 当系统各阶振荡模式的阻尼为正时,无论扰

动源的频率与系统振荡模式的频率相等与否,自由分量最终衰减为 0,只剩下类似于无阻尼等幅自由振荡的强制分量。这表明,只有从包含自由分量的强迫振荡起振(瞬态)阶段的响应中,才有可能提取得到系统振荡的阻尼^[10];

4) 某阶振荡模式下,不同系统状态响应之间的幅值比和相位差与系统初始条件和时间 t 无关,分别等于右特征向量响应分量的模值比和辐角差;

5) 第 i 个状态变量的响应 $\Delta x_{2i}(t)$ 的幅值,与第 l 个机械功率扰动的幅值、第 r 阶振荡模式的阻尼大小有关;

6) 第 i 个状态变量的响应 $\Delta x_{2i}(t)$ 的幅值,还与第 r 阶振荡模式的右、左特征向量的第 i 个和第 l 个分量的乘积 $|\varphi_{ir} \psi_{rl}|$ 有关。这表明,响应的幅值与扰动源所在的机组参与强迫功率振荡的程度有很大关系,若机组参与该模式的程度较小,即使发生强迫功率振荡,振荡的幅值也不大。

3 辨别两种振荡类型的判据

设在阻尼振荡频率为 ω_d 的系统上施加持续周期性小扰动 x_1 ,其中 B_1 为扰动幅值, ω 为扰动频率,则系统的响应为

$$x(t) = x_0 + x_1 \quad (14)$$

式中: $x_0 = B_0 \sin(\omega_d t + \varphi)$ 为强迫分量; $x_1 = B_1 e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \psi)$ 为自由分量。

可以证明:对于有较大幅值、影响电力系统安全运行的强迫振荡,通常有 $B_1 \approx -B_0$, $\omega \approx \omega_d$, $\omega_n \approx \omega$, $\psi \approx \varphi$ 。不失一般性,发生低频振荡时,系统的响应曲线可以表示为

$$x = B \sin(\omega t) - B e^{\alpha t} \sin(\omega t) \quad (15)$$

设 $t = t_i$ 时 $x = x(t_i)$ 为振荡曲线 x 的上包络线上的一个极大值:

当 $\alpha > 0$ 时,曲线在 $t_i = \frac{2k\pi + 0.5\pi}{\omega}$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ 时,达到每次个振荡周期内的最大值 $x_{\max}(t) = -B + B e^{\alpha t}$;

当 $\alpha < 0$ 时,曲线在 $t_i = \frac{2k\pi + 0.5\pi}{\omega}$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ 时,达到每个振荡周期内的最大值 $x_{\max}(t) = B - B e^{\alpha t}$;

在 $x(t)$ 取得最大值点 t_k 依次对 $x_{\max}(t)$ 求一次、

二次微分,可得:

$$\text{当 } \alpha > 0 \text{ 时 } \begin{cases} x'_{\max}(t_k) = \alpha B e^{\alpha t_k} > 0 \\ x''_{\max}(t_k) = \alpha^2 B e^{\alpha t_k} > 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{当 } \alpha < 0 \text{ 时 } \begin{cases} x'_{\max}(t_k) = -\alpha B e^{\alpha t_k} > 0 \\ x''_{\max}(t_k) = -\alpha^2 B e^{\alpha t_k} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

由式(16)可知,当 $\alpha > 0$ 时,系统的阻尼为负,此时 $x'_{\max}(t_k) > 0, x''_{\max}(t_k) > 0$, 振荡响应包络线的一次差分 and 二次差分二者同号, 依此可判断出振荡类型为系统阻尼为负导致的增幅振荡。由式(17)可知, 当 $\alpha < 0$ 时,系统的阻尼为正,此时 $x'_{\max}(t_k) > 0, x''_{\max}(t_k) < 0$, 振荡响应包络线的一次差分 and 二次差分二者异号, 依此可判断出是由于存在扰动源而引起的强迫振荡。经过以上的分析,得到基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据,如表 1 所示。

表 1 基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据

振荡类型	衰减系数	包络线的一次差分	包络线的二次差分
强迫功率振荡	负号	正号	负号
负阻尼自由振荡	正号	正号	正号

从表 1 可以看出,当 $\alpha > 0$ 时可得 $x'_{\max}(t_k) > 0, x''_{\max}(t_k) > 0$, 二者同号, 依此判断系统阻尼为负, 呈现的增幅振荡是由于阻尼为负而导致的负阻尼自由振荡; 当 $\alpha < 0$ 时可得 $x'_{\max}(t_k) > 0, x''_{\max}(t_k) < 0$, 二者异号, 依此判断系统阻尼为正, 振荡是由于存在扰动源而引起的强迫振荡; 因此工程分析中可以通过 WAMS 的数据获取实测功率振荡曲线, 求出功率振荡峰峰值, 做一次差分 and 二次差分计算, 根据计算结果判断为负阻尼振荡模式或强迫振荡模式。

4 实例验证

新疆某区域电网有 3 座火电厂, 仅通过 2 回 220 kV 线路与主网相连。2014 年 9 月 20 日, 区域电网与主网相连的联络断面出现低频振荡, 有功功率在 43 ~ 91 MW 范围内摆动。通过调取 PMU 数据发现, A 电厂、B 电厂、C 电厂机组均出现波动, 其中 A 电厂机组波动最明显, 有功出现 30 ~ 50 MW 波动, 振荡频率约为 0.5 Hz。图 1 为 PMU 记录的 A

电厂 1 号机组有功功率振荡曲线。

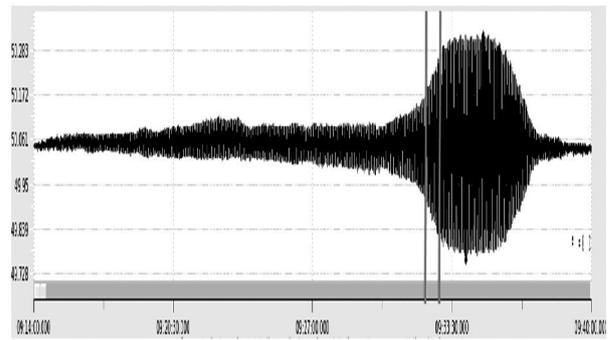


图 1 A 电厂 1 号机组有功功率振荡曲线

取振荡幅值较大的 A 电厂 1 号机组有功功率 PMU 录波曲线起振段的连续增幅振荡 7 个周波的峰峰值进行分析, 计算结果如表 2 所示。

表 2 用振荡类型判别法计算结果

$\Delta t/s$	$x'_{\max}(t_k)$	$x''_{\max}(t_k)$	判据
2	7.55	-0.762	异号
2	6.026	-0.197 5	异号
2	5.631	-0.137	异号
2	5.357	-0.263 5	异号
2	4.83	-0.698	异号
2	3.434	-0.343 5	异号
2	2.747	-0.123 5	异号

从表 2 计算结果可以看出: $x'_{\max}(t_k) > 0, x''_{\max}(t_k) < 0$, 符合表 1 中的基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据, 因此可以确定该起低频振荡事故为强迫功率振荡。这与该起事故分析结果一致, 通过计算分析以及现场相关试验后发现 A 电厂机组调速系统为该起事故的扰动源。

5 结论

通过对两种低频振荡响应特性进行研究, 分析两种低频振荡的特征及区别, 提出了基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据。该判据可以有效地利用 WAMS、PMU 的故障录波数据, 快速准确地判别出功率振荡的起因是由于系统缺乏阻尼还是由于系统内存在强迫振荡源, 从而有助于准确采取措施抑制振荡扩展, 快速平息振荡, 保证电网安全稳定运行。

(下转第 77 页)

4 结 论

通过对扩建变电站的电磁环境影响初步探讨,得出以下结论:

1) 变电站扩建后引起站外工频电场和工频磁场增加的因素为扩建的主变压器和出线间隔;

2) 在无法找到完全满足规范要求的类比变电站时,可通常对变电站扩建前电磁环境现状监测值按主变压器台数和出线回路数进行修正,修正值能保守反映变电站扩建后电磁环境影响的预测值;

3) 变电站主变压器扩建修正时可采用变电站扩建前电磁环境现状监测值乘以扩建后主变压器台数与原主变压器台数的比值进行修正;

4) 变电站出线回路数修正时可采用变电站扩建前电磁环境现状监测值乘以扩建后出线回路数与原出线回路数的比值进行修正。

参考文献

[1] HJ24-2014 环境影响评价技术导则输变电工程[S].

(上接第4页)

参考文献

[1] 王珍珍. 调速系统引发低频振荡的机理及抑制措施研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.

[2] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21-25.

[3] 刘辉, 杨寅平, 田云峰, 等. 电力系统强迫功率振荡实例及机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 113-117.

[4] 徐衍会, 贺仁睦, 韩志勇. 电力系统共振机理低频振荡扰动源分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 83-87.

[5] 杨慧敏. 区域电网低频振荡特性分析与抑制方法的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

[6] 魏云冰, 和萍, 李山德, 等. 电力系统低频振荡机理及控制策略研究[J]. 山东科技大学学报, 2008, 2(3): 23-26.

[2] 巩延果. 500 kV 变电站站内工频电磁场检测分析[J]. 广西电力, 2012, 35(4): 67-69.

[3] 刘岳定, 王里奥, 江玲燕. 重庆市典型变电站站场外工频电磁场实测分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(3): 138-140.

[4] 赵志勇, 宋晓东, 朱艳秋. 110~220 kV 高压变电站电磁环境影响因素分析[J]. 中国辐射卫生, 2010, 19(4): 452-453.

[5] 钱承萍, 杨琼分, 黄川友, 等. 关于新建110 kV 变电站电磁环境影响评价的几点建议[J]. 能源环境保护, 2012, 26(5): 53-55.

[6] 阮黎东, 宋福祥, 孙全红. 高压变电站对周围环境的影响与评价[J]. 电力环境保护, 2005, 21(3): 1-3.

[7] 赵素丽, 史玉柱. 设置变电站电磁环境影响防护控制区的必要性探讨[J]. 电力环境保护, 2008, 24(3): 50-53.

作者简介:

曾 媛(1981), 硕士, 工程师, 主要从事输变电工程环境影响评价

(收稿日期: 2015-02-20)

[7] 宋墩文, 杨学涛, 丁巧林, 等. 大规模互联电网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2011(10): 22-28.

[8] 耿天翔, 张竹竞, 项丽, 等. 基于起振特性的强迫振荡扰动源定位及解列方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015(6): 98-103.

[9] 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.

[10] 王茂海, 孙昊. 强迫功率振荡源的在线定位分析技术[J]. 中国电机工程学报, 2014(34): 6209-6215.

作者简介:

周 专(1987), 硕士, 研究方向为电力系统规划、稳定与控制;
常喜强(1976), 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制;
张增强(1984), 硕士, 研究方向为电力系统规划与分析。

(收稿日期: 2015-04-29)