

互联电力系统联络线功率波动机理及其扰动概率分析

赵红生¹, 刘源², 陈伟彪², 杨东俊¹, 姚伟², 徐敬友¹, 刘子全², 文劲宇²

(1. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室
(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074)

摘要: 广域测量系统的历史数据中统计的电网每日发生有效扰动次数的突然变化能够反映系统的稳定水平的变化, 因此研究并从理论上给出扰动概率和阻尼比的数学关系对分析和评估电网的稳定性具有重要意义。基于此, 在分析了计及网络中功率扰动的小干扰计算的基础上, 通过分析联络线对扰动的响应, 推导得出了联络线功率波动幅值与阻尼比的解析关系。然后, 基于扰动服从正态分布的假设给出扰动概率与阻尼比的关系式。最后以 10 机 39 节点系统为例进行算例分析, 验证了推导得出的联络线振荡幅值解析表达式的正确性和分析了联络线功率扰动概率与阻尼比的关系。研究结果可为广域测量系统历史统计数据分析及电网稳定性评估提供理论参考。

关键词: 电力系统; 扰动概率; 波动机理; 振荡幅值; 低频振荡

Fluctuation mechanism of tie-line active power of interconnected power system and its oscillation probability analysis

ZHAO Hongsheng¹, LIU Yuan², CHEN Weibiao², YANG Dongjun¹, YAO Wei², XU Jingyou¹,
LIU Ziquan², WEN Jinyu²

(1. State Grid HBEPCC Economic & Technology Research Institute, Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: The daily statistics of valid disturbances recorded in the historical data of the wide-area measurement system (WAMS) can reflect the stability level of a power grid. The formulas of the small signal analysis including power disturbance on the grid is given firstly; then the relationship between damping ratio and response of the oscillation magnitude of the tie-line active power is analyzed; and the relationship of the oscillation probability and damping ratio is obtained. Finally, a case study based on 10-machine 39-bus power system verifies the validity of the expression of oscillation amplitude of tie-line active power and the relationship between the oscillation probability and damping ratio. These theoretical results can be used to guide the power operator to assess the damping level of the power grid based on the daily oscillations number recored by WAMS.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207063).

Key words: power system; oscillation probability; fluctuation mechanism; oscillation magnitude; low frequency oscillations

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0001-09

0 引言

低频振荡是影响大型互联电网安全稳定运行的主要威胁之一, 其机理分析和抑制措施等相关问题一直是电力系统研究的热点^[1-7]。分析电力系统低频

振荡主要方法包括特征值法和在线监测方法。随着广域测量系统(Wide-area measurement system, WAMS)的发展, 为理论分析和在线监测低频振荡的开辟了新的思路和方法, 主要包括有: 对振荡进行统计和评估, 在线辨识^[7-12]; 通过监测得到的振荡波形, 提出强迫振荡这一新的低频振荡机理^[13-14]; 通过 WAMS 数据进行振荡机理分析和特征判别^[15-17]以

基金项目: 国家自然科学基金项目(51207063)

及通过 WAMS 数据进行扰动源定位等等^[18-24]。这些工作对于基于 WAMS 的低频振荡分析都具有非常积极的意义。

不过, WAMS 的历史数据则很少有人使用, 历史数据能够反映系统运行状态随着天数的变化, 从而为系统发生事件提供一定的参考作用。文献[24]在 WAMS 的实测数据基础上, 结合负阻尼振荡和强迫功率振荡事件发生前振荡模式的分布统计特征, 对电力系统低频振荡性质进行了分析和判断。图 1 给出了实际电网中根据某次弱阻尼振荡发生前的 WAMS 历史数据的统计结果。对于弱阻尼振荡, 可以看出其发生前的特征主要表现为在大规模振荡前几天, 某一振荡频率下的扰动次数呈连续大幅度增长趋势, 显现出弱阻尼模式可能被激发的现象。

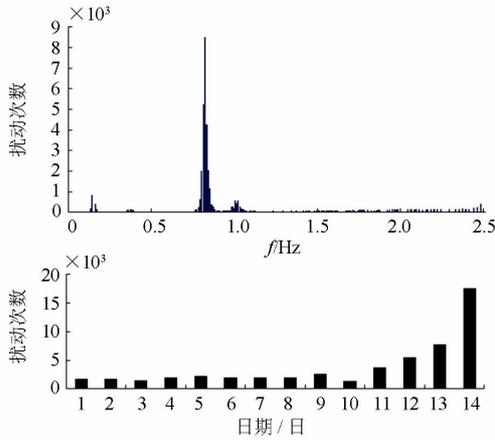


图 1 某次振荡前系统振荡模式分布及其扰动次数统计

Fig. 1 Distribution statistics of low-frequency oscillation mode and oscillation times of a practical power system

这里的一次有效扰动是指振荡发生后连续 r 个周波(这里取 $r=5$)幅值仍大于一个阈值的振荡。对调度人员而言, 这种扰动并不告警, 且一天可能出现几千次至上万次, 因此每次分析其阻尼比并没有太大意义。但是, 扰动次数随着日期增多却可能从总体上反映这一模式的阻尼比在这几天的运行当中逐渐减弱, 并有可能引起低频振荡事故, 因而能够对调度人员起到预警作用。因此, 分析并从理论上给出有效扰动概率和阻尼比的统计规律, 可为电力系统运行人员对电网稳定状况的评估提供理论上的指导。

本文以研究有效扰动概率和阻尼比的统计规律为目标, 通过小干扰计算分析, 给出了功率扰动加入网络任意节点的表达式, 并通过推导联络线功率表达式分析了振荡幅值和阻尼比的关系。在此基础上, 通过假设电网扰动的分布, 计算不同阻尼比下

联络线的扰动概率, 进而给出它们的对应关系。最后以 10 机 39 节点系统为例, 验证了本文所提思路的正确性和可行性。

1 计及网络功率扰动的小干扰分析

电力系统在数学上可以统一采用如下的一组微分-代数方程组来描述。

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f(X, Y) \\ 0 &= g(X, Y) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: X 表示电力系统的状态变量; Y 表示代数方程组中系统的代数变量。

使用潮流方程作为式(1)的网络方程, 可以得到线性化方程为^[25]

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X} &= A_1 \Delta X + B_1 \Delta \mathbf{I}_g + B_2 \Delta \mathbf{V}_g \\ C_1 \Delta X + D_1 \Delta \mathbf{I}_g + D_2 \Delta \mathbf{V}_g &= 0 \\ C_2 \Delta X + D_3 \Delta \mathbf{I}_g + D_4 \Delta \mathbf{V}_g + D_5 \Delta \mathbf{V}_l &= 0 \\ D_6 \Delta \mathbf{V}_g + D_7 \Delta \mathbf{V}_l &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, 四个式子依次为线性化后的发电机微分方程、发电机定子电压方程、发电机节点的潮流方程和非发电机节点的潮流方程。式中: $\Delta \mathbf{I}_g = [\Delta I_{d1}, \Delta I_{q1}, \dots, \Delta I_{dm}, \Delta I_{qm}]^T$; $\Delta \mathbf{V}_g = [\Delta \theta_1, \Delta V_1, \dots, \Delta \theta_m, \Delta V_m]^T$; $\Delta \mathbf{V}_l = [\Delta \theta_{m+1}, \Delta V_{m+1}, \dots, \Delta \theta_n, \Delta V_n]^T$; m 为发电机台数; n 为系统总节点数。 ΔI_{di} 、 ΔI_{qi} 分别是第 i 个发电机机端电流的 d 轴和 q 轴分量, $i=1, 2, \dots, m$; $\Delta \theta_i$ 、 ΔV_i 分别是第 i 个发电机机端电压的相角和幅值, $i=1, 2, \dots, n$ 。 A_1 至 D_7 各参数矩阵的表达式见附录^[25]。

假定系统出现功率扰动 ΔP_1 , 功率扰动可以发生在发电机内部转子方程上, 或是网络中的负荷节点或者发电机母线节点。功率扰动发生在发电机转子方程上的表达式在诸多文献里都有讨论, 这里不再赘述。下面给出功率扰动发生在网络上时的小干扰表达式。

扰动 ΔP_1 可以是冲击、阶跃、正弦等信号。以某一负荷节点 i 为例, 将 ΔP_1 添加在线性化后的非发电机网络方程上, 得到节点 i 的网络方程为

$$\begin{aligned} \Delta P_1 + [D_{6(i,1)} \cdots D_{6(i,j)} \cdots D_{6(i,m)}] \Delta \mathbf{V}_g + \\ [D_{7(i,m+1)} \cdots D_{7(i,j)} \cdots D_{7(i,n)}] \Delta \mathbf{V}_l = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中,

$$D_{6(i,j)} = -V_{i0} [V_{j0} Y_{ij} \sin(\theta_{i0} - \theta_{j0} - \alpha_{ij}) \\ Y_{ij} \cos(\theta_{i0} - \theta_{j0} - \alpha_{ij})] (j=1, 2, \dots, m)$$

$$D_{7(i,j)} = -V_{i0} [V_{j0} Y_{ij} \sin(\theta_{i0} - \theta_{j0} - \alpha_{ij}) \\ Y_{ij} \cos(\theta_{i0} - \theta_{j0} - \alpha_{ij})] (j=m+1, \dots, n \text{ 且 } j \neq i)$$

$$D_{7(i,j)} = [V_{i0} \sum_{k=1, k \neq i}^n V_{k0} Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) - \sum_{k=1, k \neq i}^n V_{k0} Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) - V_{i0} Y_{ii} \cos \alpha_{ii}]$$

$$(j = m+1, \dots, n \text{ 且 } j = i)$$

式中: V_{i0} 、 V_{k0} 、 θ_{i0} 、 θ_{k0} 分别为 i 、 k 节点的线性化稳态运行点的电压幅值和相角; Y_{ik} 、 α_{ik} 分别为 i 、 k 节点间导纳的幅值和相角。

此时, 式(2)中的非发电机网络方程改写为

$$C_4 \Delta P_1 + D_6 \Delta V_g + D_7 \Delta V_n = 0 \quad (4)$$

其中, $C_4 = [0 \ \dots \ 1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$, 其元素为 1 处是第 i 号节点的有功功率线性化方程。

对用式(4)替代后的式(2)进行非状态变量消去, 原系统方程可以化为

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + K_F \Delta P_1 \quad (5)$$

其中, A 为原系统状态空间矩阵。 K_F 表达式为 $K_F = (B_2 - B_1 D_1^{-1} D_2) D_8^{-1} D_5 D_7^{-1} C_4$, 其中 $D_8 = D_4 - D_3 D_1^{-1} D_2 - D_5 D_7^{-1} D_6$ 。

同理, 如果功率扰动发生在发电机母线上, 式(2)中的发电机节点潮流方程变为

$$C_3 \Delta P_1 + C_2 \Delta X + D_3 \Delta I_g + D_4 \Delta V_g + D_5 \Delta V_n = 0 \quad (6)$$

其中, $C_3 = [0 \ \dots \ 1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$, 其元素为 1 处是该发电节点的有功功率线性化方程。系统动态方程仍可用式(5)表示, 此时, $K_F = (B_2 - B_1 D_1^{-1} D_2) D_8^{-1} C_3$ 。

通过式(5)和 K_F 的表达式可以看到, 无论网络中哪一节点上发生何种形式的扰动, 都将通过网络方程和定子电压方程分散到动态方程上, 然后再通过动态方程可以计算得到全系统的响应。式(5)将作为后续分析联络线对功率扰动响应的基础。

2 扰动概率与系统阻尼比对应关系分析

2.1 联络线响应幅值与扰动的关系

对状态空间矩阵 A 进行特征值计算, 能够得到特征根对角阵 $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, 右特征向量矩阵 $U = [u_1, u_2, \dots, u_n]$, 左特征向量矩阵的转置 $V^T = U^{-1}$ 。根据左右特征向量的定义有

$$U^{-1} A U = \Lambda \quad (7)$$

那么, 令 $\Delta X = U \Delta Z$, 其中 ΔZ 是 ΔX 做线性变换后得到的解耦状态变量, 则在系统某一点加入扰动后, 对式(5)采用线性变换, 有

$$\Delta \dot{Z} = U^{-1} A U \Delta Z + U^{-1} K_F \Delta P_1 = \Lambda \Delta Z + V^T K_F \Delta P_1 \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 不仅各个模式被解耦, 扰动

量也被解耦到每一个模式上, 可以分别进行计算。那么对于阻尼比较高的模式, 可以认为该模式受扰后快速稳定, 系统中主要观测到的是阻尼较弱的区间振荡模式。

根据引言所述, 研究对象的情况为系统中主要体现某一个主振荡模式, 而其他模式的振荡基本没有出现。假定这一主振荡模式对应的特征值为 $\lambda_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_d$, 扰动为面积为 F 的冲击扰动 $F\delta(t)$, 则从式(8)中提取出的主振荡模式对应的方程为

$$\Delta \dot{Z}_i = \lambda_i \Delta Z_i + (V_i^T K_F) F \delta(t) \quad (9)$$

可以得到

$$\begin{cases} \Delta Z_{i1} = (V_{i1}^T K_F) F e^{(-\alpha + j\omega_d)t} \\ \Delta Z_{i2} = (V_{i2}^T K_F) F e^{(-\alpha - j\omega_d)t} \end{cases} \quad (10)$$

再由 $\Delta X = U \Delta Z$, 对式(10)进行线性变换, 得到

$$\Delta X = U_{i1} (V_{i1}^T K_F) F e^{(-\alpha + j\omega_d)t} + U_{i2} (V_{i2}^T K_F) F e^{(-\alpha - j\omega_d)t} \quad (11)$$

其中: U_i 表示 U 的第 i 列; V_i^T 表示 V^T 的第 i 行。计算发现 $U_{i1} (V_{i1}^T K_F)$ 与 $U_{i2} (V_{i2}^T K_F)$ 互为共轭, 故 ΔX 的时域表达式最终简化为

$$\Delta x(t) = e^{-\alpha t} K_X F \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (12)$$

其中, $K_X = 2 |(U_i V_i^T K_F)|$, 可以认为其反应了系统自身特性(左右特征向量)对振荡幅值的影响。

联络线上的功率幅值可以由代数变量 ΔY 表示, 而 ΔY 又可以由 ΔX 表示, 那么其有功振荡表达式可以写为

$$\Delta P_{\text{line}}(t) = e^{-\alpha t} K_1 F \sin(\omega_d t + \varphi_2) \quad (13)$$

其中, K_1 由 K_X 与网络方程计算而来。可以假定这一关系为 $K_1 = G K_X$ 。也就是说, 功率振荡幅值 K_1 受到系统扰动位置、系统小干扰特性、扰动量大小、观测位置和随时间衰减的影响, 分别体现在参数 K_F 、 U_i 与 V_i^T 、 F 、 G 、 α 上。

同理, 对于阶跃扰动, 也可以推出联络线功率表达式, 假设阶跃扰动为 $Fu(t)$, F 表示阶跃量值。那么联络线功率表达式仍然可以写为

$$\Delta P_{\text{line}}(t) = K_2 + e^{-\alpha t} K_1 F \sin(\omega_d t + \varphi_2) \quad (14)$$

体现为一偏置量加一个振荡的形式, 此时振荡量的幅值表达式为

$$K_1 = G \left| \frac{U_{i1} V_{i1}^T K_F}{\lambda_{i1}} + \frac{U_{i2} V_{i2}^T K_F}{\lambda_{i2}} \right| \quad (15)$$

在小扰动范围内, 对于阶跃扰动, 联络线上的功率振荡频率、阻尼没有发生变化, 且幅值也仍然是 $e^{-\alpha t} K_1 F$ 的形式。对于关注的阻尼较弱的模式, 由于其实部远小于虚部, 其对 λ 绝对值影响很小。忽

略这一影响后, 其余影响冲击和阶跃扰动时联络线上振荡幅值 K_1 的条件就是相同的, 它们相差 ω_0 倍。因此对于振荡而言, 研究阶跃扰动时联络线幅值响应的规律就可以用冲击扰动代替。

2.2 振荡幅值与阻尼比的关系

由于需要分析联络线上有效扰动概率与阻尼比的关系, 而工程实际中一次有效扰动记录是由振荡连续 r 个周波的振荡幅值大于设定阈值来确定的。因此, 寻找有效扰动概率与阻尼比的关系需要先确定振荡幅值与阻尼比的关系。此节详细讨论考虑阻尼比为变量时的幅值表达式。

不失一般性, 当在某一固定点施加扰动时, 考虑阻尼比的影响, 式(12)中 K_X 的表达式写为

$$K_X(\xi) = 2|U_i(\xi)V_i^T(\xi)K_F| \quad (16)$$

因而 K_1 的表达式变为

$$K_1(\xi) = GK_X(\xi) = 2G|U_i(\xi)V_i^T(\xi)K_F| \quad (17)$$

其中, ξ 为阻尼比。因而结合上述和式(13), 且考虑到 $\alpha = 2\pi f \xi / \sqrt{1-\xi^2}$, 可得联络线功率振荡幅值的包络线表达式为

$$f(\xi, t) = e^{-\alpha(\xi)t} K_1(\xi)F = e^{-2\pi f \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} t} K_1(\xi)F \quad (18)$$

其中, $K_1(\xi)$ 受阻尼比的影响是由阻尼比变化引起左右特征向量变化导致的, 在多机系统中, 需要通过计算确定。后期计算发现, 阻尼比变化对这一值影响较小。

由式(18)可令

$$g(\xi) = e^{\alpha(\xi)t} = e^{-2\pi f \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} t} \quad (19)$$

则有,

$$\dot{g}(\xi) = -\frac{2\pi f t}{(1-\xi^2)^{3/2}} e^{-2\pi f \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} t} \quad (20)$$

$$\ddot{g}(\xi) = -\frac{2\pi f t(-2\pi f t + 3\xi(1-\xi^2)^{1/2})}{(1-\xi^2)^3} \times e^{-2\pi f \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} t} \quad (21)$$

例如对于第 5 周波幅值, 由于不同初相位将使波峰位置不同, 难于确定, 因此为了简便, 此处以幅值包络线在 $t=5T$ 时的值作为第 5 周波幅值。则 $ft=5$, 一般 $0 < \xi < 0.2$, 则可知 $\dot{g}(\xi) < 0$, $\ddot{g}(\xi) > 0$ 。因此, 随着阻尼比的减小, 联络线功率振荡幅值对扰动的响应将逐渐增大, 且增大量也越来越大。

2.3 扰动概率与阻尼比的关系

根据前文所述, 一次有效扰动的工程实用定义如下。

(1) 振荡频率在 0.1~2.5 Hz 之间;

(2) 振荡的连续 r 个周波幅值大于一个阈值 M 。

假定网络中冲击扰动面积 F 服从正态分布 $N(\mu_1, \sigma_1^2)$, 并假设 $r=5$, 其响应被计作一次有效扰动的条件为

$$f(\xi, t)|_{t=5T} = e^{-\alpha(\xi)t} K_1(\xi)F|_{t=5T} = h(\xi) > M \quad (22)$$

那么, 冲击被记录成一次有效扰动的概率为

$$p(h(\xi) > M) = p(e^{-\alpha(\xi)t} K_1(\xi)F > M) = 1 -$$

$$p(F \leq F_m(\xi)) = 1 - \int_{-\infty}^{\frac{F_m(\xi)-\mu_1}{\sigma_1}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (23)$$

其中, $F_m(\xi) = M/2G|U_i(\xi)V_i^T(\xi)K_F| e^{-10\pi \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$

(24)

式中, $F_m(\xi)$ 是冲击被记录成一次有效扰动的扰动幅值阈值。通过上述数学转换, 将判断联络线功率幅值与给定阈值 M 的大小关系转变为直接判断冲击扰动面积 F 与阈值 $F_m(\xi)$ 的大小关系, 便于计算和分析。

对于电网而言, 更常见的是阶跃类型的扰动(负荷投切)。假定网络中存在扰动量服从正态分布 $N(\mu_2, \sigma_2^2)$ 的阶跃扰动, 则根据 2.1 节的结论, 在研究这一规律时, 可以将其看作一个扰动面积服从正态分布的冲击扰动, 他们在被记录为一次有效扰动的概率上所体现的规律是几乎一样的, 即可以用式(23)来表示。如果扰动发生在网络中其他节点, 只需重复上述计算即可得到不同节点扰动概率与阻尼比的关系。

3 算例分析

3.1 计算策略及其有效性验证

本文的仿真工作在 10 机 39 节点系统上开展, 系统结构如图 2 所示。仿真模型中发电机采用 4 阶模型, 励磁系统采用自并励静止励磁系统, PSS 采用 PSS1A 模型。

根据前文所述, 研究中针对系统中某一阻尼较弱模式, 即主要关注 10 机 39 节点系统中阻尼最弱的区域间振荡模式, 调整 PSS 使其余振荡模式阻尼比较高, 得到系统的振荡模式如表 1 所示。其中, 模态 1 即为关注的主导区域间振荡, 其主要是由于发电机 10 与其余机组的相对振荡而起。

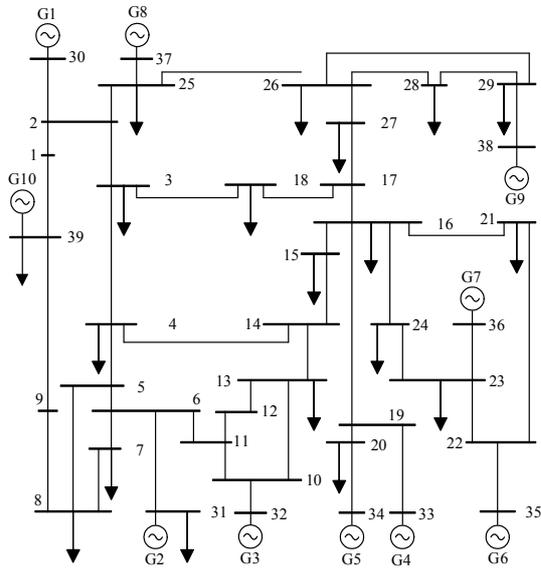


图 2 10 机 39 节点系统单线图

Fig. 2 Single-line diagram of 10-machine 39-bus system

表 1 10 机 39 节点系统振荡模式

Table 1 Modes of 10-machine 39-bus power system

模式	频率/Hz	阻尼比	参与机组
1	0.55	0.027	所有发电机
2	1.01	0.122	G2、G3、G5、G9
3	1.04	0.075	G5、G9
4	1.11	0.090	G2、G3、G5、G7
5	1.21	0.075	G1、G8、G9
6	1.31	0.140	G2、G3
7	1.40	0.139	G4、G6
8	1.46	0.102	G4、G6、G7
9	1.46	0.155	G1、G8

为了说明在小干扰下, 通过推导得到的功率表达式(13)可以代替系统暂稳仿真, 在节点 39 施加冲击扰动, 分别计算两种情况下联络线 16-17 的功率波动, 如图 3 所示。可以看出, 两者的波形差别很小。在不同节点施加冲击扰动、在不同联络线上功率的理论计算值与实际仿真值的对比有类似的结果, 故在后续的计算中采用公式计算进行分析。

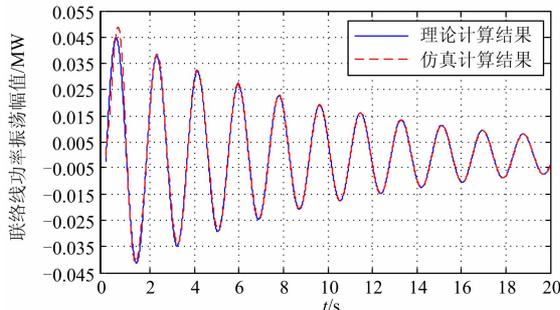


图 3 联络线功率理论计算与仿真计算结果对比图

Fig. 3 Response of tie-line active power obtained by theoretical and simulation methods

另外, 如 2.1 节中所述, 在小干扰计算范围内, 研究阶跃扰动响应的振荡部分的规律可以由冲击响应代替。更进一步说, 在小干扰范围内, 对于所研究的模式, 扰动所产生的振荡的频率、阻尼与扰动形式的关系不大, 幅值规律可以由冲击响应近似代替。为验证这一结论, 在外加冲击扰动和阶跃扰动情况下, 对联络线功率的计算结果使用 TLS-ESPRIT 方法进行分析, 结果如表 2 所示。振荡的频率, 阻尼比均非常接近。故在后续计算中以相对简单的冲击扰动作为扰动源进行分析。

表 2 不同扰动下系统特性对比

Table 2 Comparison of power system characteristics under different type disturbances

扰动形式	振荡频率/Hz	阻尼比
冲击扰动	0.546	0.027
阶跃扰动	0.545	0.029

通过本节对比分析, 主要明确了在小干扰范围内, 对于所研究的模态的有效扰动概率和阻尼比的关系, 可以以冲击扰动来研究这一规律。

3.2 固定扰动位置下有效扰动概率与阻尼比的关系

由前述内容, 产生一次有效扰动的概率可由式(23)计算。不失一般性, 这里取 $r=5$ 。通过该式可以看出, 这一规律受到阈值 M 的影响。因此, 还需要给出不同阈值下产生有效扰动的概率与阻尼比关系。

在 10 机 39 节点系统的节点 36 上施加 10 000 次面积服从 $N(\mu, \sigma^2)$ 的冲击扰动, 得到在不同的阈值 M 下功率扰动概率与系统阻尼比之间的关系曲线, 如图 4 所示。可以看出, 系统出现有效扰动的概率会随着系统阻尼比的减小而增加, 这符合传统认知。对于某一阈值而言, 阻尼比较大时, 系统几乎不会出现有效扰动; 一旦阻尼比减小到一定程度时, 有

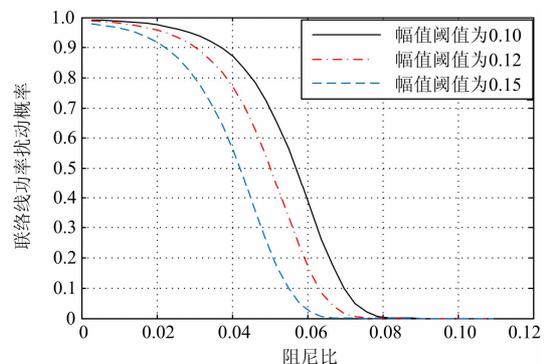


图 4 联络线功率扰动概率与系统阻尼比关系曲线

Fig. 4 Relationship between the oscillation probability of tie-line active power and the damping ratio

效扰动出现的概率会迅速增高。以阈值为 0.1 p.u. 为例，在阻尼比大于 0.08 时，这一概率几乎为 0，但是当阻尼比小于 0.07 时，有效扰动的概率从约 0.1 开始陡升，到阻尼比下降 0.03 至 0.04 时，这一概率已经增长到约 0.9。

可以看到，对于一个阈值，当系统振荡阻尼比下降到临界阻尼比以下时，系统中监测到有效扰动次数会大量增长。因此，图 1 中所示的扰动次数统计能够反映系统在连续几天运行中阻尼突然下降的情况，可以为运行人员提供预警。另外，随着阈值的增大，这一规律将向阻尼比小的方向移动，即阈值增大，临界阻尼比将更小。因此选取合适的阈值，对于这一规律的运用也很重要。

图 5 和图 6 分别表示了联络线功率扰动概率与冲击扰动幅值正态分布的均值、方差的关系。可以看出，在同一阻尼比下，联络线功率扰动概率随冲击扰动幅值均值的增加而增大；冲击扰动方差的变化主要是影响联络线功率扰动概率曲线的斜率。

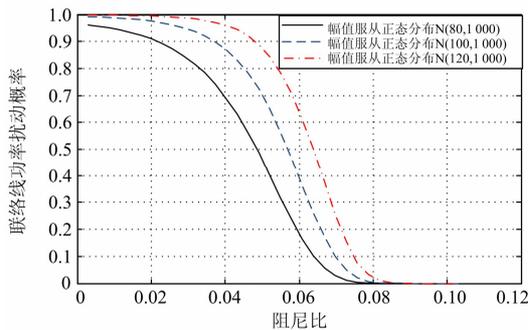


图 5 冲击扰动幅值均值对联络线功率扰动概率的影响
Fig. 5 Influence of magnitude mean values of the impulse disturbance for the oscillation probability of tie-line power

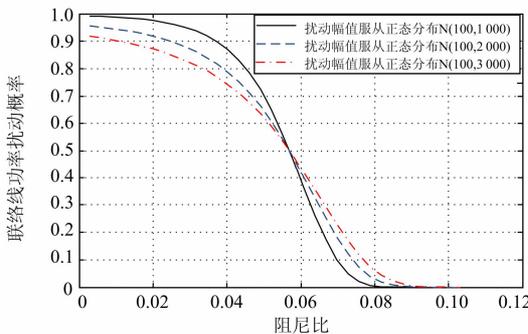


图 6 冲击扰动幅值方差对联络线功率扰动概率的影响
Fig. 6 Influence of the magnitude variance of the impulse disturbance for the oscillation probability of tie-line power

3.3 不同扰动位置时有效扰动概率与阻尼比的关系

在 10 机 39 节点系统上选取灵敏度较高的几个节点，每个节点施加 10 000 次面积服从 $N(\mu, \sigma^2)$ 的

冲击扰动，得到系统在不同位置功率扰动概率与阻尼比的关系，如图 7 所示。可以发现在不同节点施加扰动后同一联络线功率扰动概率与阻尼比的关系是一致的，即随着系统阻尼的增加，联络线出现振荡的概率会下降；当阻尼增大到一定程度后，振荡消失。

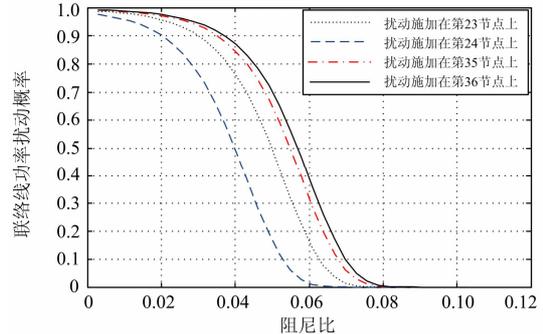


图 7 不同节点联络线功率扰动概率与阻尼比的关系曲线
Fig. 7 Relationship between the oscillation probability of tie-line power and the damping ratio in different nodes

假定冲击扰动平均分布在以上 4 个节点上，进行 10 000 次冲击扰动试验，可以得到联络线功率扰动概率与阻尼比的关系，如图 8 所示。可以看到，系统出现有效扰动的概率会随着系统阻尼比的减小而增加，这与在某一节点上施加冲击扰动得到的结论一致。

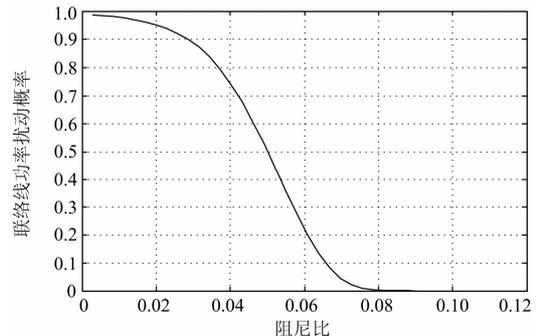


图 8 冲击扰动平均分布下联络线功率扰动概率与阻尼比的关系曲线

Fig. 8 Relationship between the oscillation probability of tie-line power and the damping ratio under hypo dispersion of the impulse disturbance

实际应用中，通过计算获得功率扰动概率和某个关键振荡模态的阻尼比关系之后，当系统发现功率扰动次数或概率突然增大时，可以预警系统阻尼比下降到某个临界阻尼比之下，同时还可以根据扰动概率和阻尼比曲线估计此时该振荡模态的阻尼比，实现系统阻尼比的监控，从而为电网运行和稳定性评估提供参考。

4 结论

本文在给出计及功率扰动的小干扰计算公式的基础上, 推导出了功率扰动下联络线振荡幅值波动值与阻尼比的关系, 基于此, 总结了不同扰动位置下引发有效扰动的概率与系统阻尼比的对应关系。主要结论如下。

1) 通过理论推导得到了求解联络线功率振幅和扰动概率的计算公式, 并通过仿真验证了其准确性。

2) 对于系统中某一节点发生扰动而言, 系统联络线发生有效扰动的概率与系统阻尼比存在一个较为明确的函数关系, 扰动概率随系统阻尼比的增加而减小, 且同一阻尼下扰动次数随有效扰动的判断阈值的增大而减小。

3) 在某一给定有效扰动的判断阈值下, 当系统阻尼比低于临界值时, 系统会出现有效扰动大幅度增多的现象。这一理论研究结论表明, 当实际系统中扰动次数大幅度增多时, 表明系统阻尼比已经减小到临界值以下。

4) 本文的研究结果能够为广域测量系统历史统计数据的统计分析及电网运行和稳定性评估提供理论参考。

附录

以4阶发电机为例, 不考虑励磁系统、调速系统及PSS, 对式(2)中的各参数进行说明。发电机动态方程为

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_i}{dt} &= \omega_i - \omega_s \\ \frac{d\omega_i}{dt} &= \frac{T_{M_i}}{M_i} - \frac{[E'_{qi} - X'_{di}I_{di}]I_{qi}}{M_i} \\ &\quad - \frac{[E'_{di} + X'_{qi}I_{di}]I_{di}}{M_i} - \frac{D_i(\omega_i - \omega_s)}{M_i} \\ \frac{dE'_{qi}}{dt} &= -\frac{E'_{qi}}{T'_{d0i}} - \frac{(X'_{di} - X'_{di})I_{di}}{T'_{d0i}} + \frac{E_{fdi}}{T'_{d0i}} \\ \frac{dE'_{di}}{dt} &= -\frac{E'_{di}}{T'_{q0i}} + \frac{I_{qi}}{T'_{q0i}}(X_{qi} - X'_{qi}) \end{aligned} \quad (25)$$

定子电压方程:

$$\begin{aligned} E'_{di} - V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - R_{si}I_{di} + X'_{qi}I_{qi} &= 0 \\ E'_{qi} - V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - R_{si}I_{qi} + X'_{di}I_{di} &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

发电机节点网络方程:

$$\begin{aligned} I_{di}V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + I_{qi}V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + \\ P_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) &= 0 \\ I_{di}V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - I_{qi}V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + \end{aligned} \quad (27)$$

$$Q_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0$$

式中, $i=1, 2, \dots, m$ 。

非发电机节点网络方程:

$$\begin{aligned} P_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) &= 0 \\ Q_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) &= 0 \end{aligned} \quad (28)$$

式中, $i=m+1, m+2, \dots, n$ 。

对式(25)~式(28)线性化, 并写成矩阵形式, 即可得到式(2)中 A_1 至 D_7 的矩阵表达式:

$$A_1 = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & A_{1i} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-I_{qi0}}{T_{Ji}} & \frac{-I_{di0}}{T_{Ji}} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T'_{d0i}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T'_{q0i}} \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, \dots, m.$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & B_{1i} \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中,

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{E'_{di0} - (X'_{di} - X'_{qi})I_{qi0}}{T_{Ji}} & \frac{E'_{qi0} - (X'_{di} - X'_{qi})I_{di0}}{T_{Ji}} \\ -\frac{X'_{di} - X'_{di}}{T'_{d0i}} & 0 \\ 0 & \frac{X_{qi} - X'_{qi}}{T'_{q0i}} \end{bmatrix},$$

$i=1, 2, \dots, m$ 。

$$B_2 = 0 \quad (31)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & C_{1i} \end{bmatrix} \quad (32)$$

式中, $C_{ii} = \begin{bmatrix} -V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 0 & 1 \\ V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $i=1, 2, \dots$,

m 。

$$C_2 = \begin{bmatrix} C_{21} & & 0 \\ & \dots & \\ 0 & & C_{2i} \end{bmatrix} \quad (33)$$

式中, $C_{2i} = \begin{bmatrix} I_{di0} V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 0 & 0 \\ -I_{qi0} V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & & & \\ -I_{di0} V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 0 & 0 \\ -I_{qi0} V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & & & \end{bmatrix}$, $i=1,$

$2, \dots, m$ 。

D_1 至 D_7 求法类似, 这里就不再赘述。

参考文献

- [1] 苏寅生. 南方电网近年来的功率振荡事件分析[J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 54-57.
SU Yinsheng. Analysis on the CSG's power oscillation events in recent years[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 54-57.
- [2] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [3] 顾丽鸿, 周孝信, 陶洪铸, 等. 局部弱联诱发互联电网强迫振荡机制分析[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 36-43.
GU Lihong, ZHOU Xiaoxin, TAO Hongtao, et al. Analysis on mechanism of inter-area forced oscillation caused by local weak interconnection in interconnected power grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 36-43.
- [4] 王娜娜, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于 EMD_TEO 及信号能量分析法的主导低频振荡模式识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 198-204.
WANG Nana, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Identification of dominant inertial modes based on EMD-TEO and signal energy method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 198-204.
- [5] 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): 27-7.
- [6] 李勋, 龚庆武, 贾晶晶, 等. 基于原子稀疏分解的低频振荡模态参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 124-133.
LI Xun, GONG Qingwu, JIA Jingjing, et al. Atomic sparse decomposition based identification method for low-frequency oscillation modal parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 124-133.
- [7] 杨慧敏, 易海琼, 文劲宇, 等. 一种实用的大电网低频振荡概率稳定性分析方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 124-129.
YANG Huimin, YI Haiqiong, WEN Jinyu, et al. A practical stability analysis method for large-scale power system based on low-frequency-oscillation probability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 124-129.
- [8] 程云峰, 张欣然, 陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153.
CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153.
- [9] 邱夕兆, 于占勋, 雷鸣, 等. 山东电网基于 WAMS 的低频振荡统计与评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 95-98.
QIU Xizhao, YU Zhanxun, LEI Ming, et al. WAMS based statistics and assessment of low frequency oscillation in shandong power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 95-98.
- [10] 鞠萍, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56-60.
JU Ping, XIE Huan, MENG Yuanjing, et al. Online identification of low-frequency oscillations based on wide-area measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 56-60.
- [11] 陈刚, 吴小陈, 柳勇军, 等. 基于频域分解法和广域稳态量测的低频振荡模式辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 56-60.
CHEN Gang, WU Xiaochen, LIU Yongjun, et al. Identification of low-frequency oscillation modes based on frequency domain decomposition method and wide area ambient measurements[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 56-60.
- [12] 张亮, 张新燕, 王维庆. 基于改进多信号矩阵束算法的电力系统低频振荡识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 26-30.
ZHANG Liang, ZHANG Xinyan, WANG Weiqing. Identification of low-frequency oscillations based on improved multi-signal matrix pencil algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 26-30.

- [13] 汤勇. 电力系统强迫功率振荡的基础理论[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 29-33.
TANG Yong. Fundamental theory of forced power oscillation in power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 29-33.
- [14] 汤勇. 电力系统强迫功率振荡分析[J]. 电网技术, 1995, 19(12): 6-10.
TANG Yong. The analysis of forced power oscillation in power system[J]. Power System Technology, 1995, 19(12): 6-10.
- [15] 杨东俊, 丁坚勇, 周宏, 等. 基于 WAMS 量测数据的低频振荡机理分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 24-28.
YANG Dongjun, DING Jianyong, ZHOU Hong, et al. Mechanism analysis of low frequency oscillation based on WAMS measured data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 24-28.
- [16] 王娜娜, 廖清芬, 唐飞, 等. 基于割集能量及灵敏度的强迫功率振荡扰动源识别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 75-80.
WANG Nana, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Disturbance source identification based on cutset energy and sensitivity for forced power oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 75-80.
- [17] 叶华, 宋佑斌, 刘玉田. 强迫功率振荡响应解析与振荡类型判别[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 197-204.
YE Hua, SONG Youbin, LIU Yutian. Forced power oscillation response analysis and oscillation type discrimination[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 197-204.
- [18] 董清, 梁晶, 颜湘武, 等. 大规模电网中低频振荡扰动源的定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 78-83.
DONG Qing, LIANG Jing, YAN Xiangwu, et al. Locating method of disturbance source of low frequency oscillation in large scale power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 78-83.
- [19] 李文锋, 郭剑波, 李莹, 等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(1)割集能量法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 41-46.
LI Wenfeng, GUO Jianbo, LI Ying, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS part 1: method of cutset energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 41-46.
- [20] 李文锋, 李莹, 周孝信, 等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(2)力矩分解法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 47-53.
LI Wenfeng, LI Ying, ZHOU Xiaoxin, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS part 2: method of torques decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 47-53.
- [21] 陈磊, 闵勇, 胡伟, 等. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位(一)理论基础与能量流计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 22-27.
CHEN Lei, MIN Yong, HU Wei, et al. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy part one mathematical foundation and energy flow computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 22-27.
- [22] 陈磊, 陈亦平, 闵勇, 等. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位(二)理论基础与能量流计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 1-5.
CHEN Lei, CHEN Yiping, MIN Yong, et al. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy part two method for oscillation source location and case studies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 1-5.
- [23] STATON S E. Transient stability monitoring for electric power systems using a partial energy function[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(4): 1389-1396.
- [24] 杨东俊, 丁坚勇, 邵汉桥, 等. 基于 WAMS 的负阻尼低频振荡与强迫振荡的特征判别[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 57-61.
YANG Dongjun, DING Jianyong, SHAO Hanqiao, et al. WAMS-based characteristic discrimination of negative damping low-frequency oscillation and forced oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 57-61.
- [25] SAUER P W, PAI M A. Power system dynamics and stability[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

收稿日期: 2014-10-20; 修回日期: 2014-11-27

作者简介:

赵红生(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划及电力系统运行与控制等;

陈伟彪(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制;

姚伟(1983-), 男, 博士, 讲师, 通信作者, 主要从事电力稳定与控制、柔性直流输电系统方面的研究。E-mail: w.yao@hust.edu.cn

(编辑 姜新丽)