

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.04.011

# 电力系统频率动态与功角振荡的耦合特性分析

马睿聪<sup>1</sup>, 刘福锁<sup>2,3</sup>, 曹永吉<sup>1,4</sup>, 王超<sup>3</sup>, 张恒旭<sup>1</sup>, 李威<sup>2,3</sup>

(1. 山东大学(电网智能化调度与控制教育部重点实验室), 山东 济南 250061;

2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106;

3. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106;

4. 山东大学智能创新研究院, 山东 济南 250101)

**摘要:**为探究频率动态与功角振荡间的耦合特性,文中以双机系统为例推导扰动后系统稳定电网频率动态特性和功角振荡机理,基于扩展等面积准则(extended equal area criterion, EEAC)扩展至多机系统,提出了基于 Pearson 系数的耦合强度量化评估指标,根据频率动态特征和功角振荡特征对耦合关系进行量化。文中分析了功角振荡对频率动态特征指标的影响,量化评估了不同频率动态指标与功角振荡指标的耦合强度。理论分析和算例结果表明构建的指标体系具有合理性,电力系统的频率动态与功角振荡相互耦合,为频率和功角的优化控制措施提供了参考。

**关键词:**频率动态;功角振荡;耦合特性;量化分析;频率稳定;同步稳定

**中图分类号:** TM71

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)04-0102-11

## 0 引言

电网受扰后频率动态行为与功角振荡过程运行机理复杂<sup>[1]</sup>。电网振荡过程中,频率变化使得系统中功角发生改变,功角振荡改变电网中发电机组电磁功率分布,加速转矩改变,影响频率变化,二者间存在耦合性。对电网频率动态与功角振荡进行耦合特性分析,能为电网控制策略分析提供理论依据,降低电网运行风险,提升电网稳定性<sup>[2]</sup>。

电力系统动态频率响应指系统频率会从正常运行状态过渡到一个新的稳态或失稳状态<sup>[3]</sup>。国内外学者已对电网频率响应分析进行诸多研究,文献[4]对电网惯量研究的各项概念进行阐述,为电网频率响应分析提供理论支撑。文献[5]将频率响应过程划分为4个阶段:扰动初始阶段、惯量响应阶段、一次调频响应阶段和二次调频响应阶段。文献[6]对系统频率响应(system frequency response, SFR)模型进行改进,进一步考虑发电机励磁系统对频率影响,提高了频率动态响应分析的精度。文献[7]对含分布式能源(distributed energy resources, DERs)配电网仿真建模进行频率响应分析,高比例 DERs 接入使频率动态过程变化更复杂。文献[8]对基于人工智能的频率响应估算进行深度剖析,总结深度学习在频率响应分析中的应用现状。文献

[9]对惯性时间常数、一次调频死区和调差系数等调频关键参数进行分析,研究关键参数与稳态频率偏差 $\Delta f_n$ 、最大频率偏差 $\Delta f_{\max}$ 、频率变化率 $d\Delta f/dt$ 和到达频率最低点的时间 $T_{\text{nadir}}$ 等频率特征指标间灵敏度。文献[10]对 SFR 模型进行详细分析,构建新能源接入下的 SFR 模型。文献[11]提出一种基于风-光-水-火联合发电机组 SFR 模型的频率响应分析方法。文献[12]对频率响应的分散性、统一性、独立性和耦合性进行分析,提出频率响应特征量化方法。文献[13]针对电网发生故障后频率变化特征进行分析,阐述了频率动态行为,上述文献在对系统频率动态过程进行分析时,未考虑由于功角振荡产生的功率不平衡量,忽略了频率动态与功角振荡之间的耦合性。

在电网中发生大扰动时,系统功角变化会出现振荡过程,对该过程机理研究,在电力系统稳定分析方面有着重要意义<sup>[14-15]</sup>。文献[16]开展大规模双馈型风电并网对送端功角稳定性研究。文献[17]对暂态功角特征进行提取,通过 $k$ -medoids 聚类方法区分实现故障筛选。文献[18]探究功角失稳与感应电动机失稳间耦合性,二者为正反馈关系。文献[19]对连锁故障下功角稳定进行分析,结合离散马尔可夫模型和 Lyapunov 函数推导出鲁棒随机稳定性判据,利用线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)进行电力系统功角稳定性判别。文献[20]利用扩展等面积准则(extended equal area criterion, EEAC)分析系统暂态特征,研究解列

收稿日期:2023-01-18;修回日期:2023-03-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177096);国家电网有限公司科技项目(5100-202140342A-0-0-00)

后局部电网功角首摆失稳问题,分析影响首摆稳定性因素。文献[21]考虑电网在极端场景运行,对电力系统功角稳定性进行分析。文献[22]探究功角失稳与电压失稳间耦合性,采用发电机和负荷之间的交互强度指标与暂态网络传输能力指标进行量化分析。现阶段已有文献证明,系统功角稳定性与系统电压稳定、感应电动机稳定有密切联系,但在频率动态和功角振荡耦合特性方面研究相对缺乏。

因此,文中提出电力系统频率动态与功角振荡间耦合强度评估方法。首先,对二机系统分析,推导频率动态与功角振荡的耦合关系,分析扰动后系统频率动态与功角振荡的耦合运动机理;其次,采用 EEAC 准则将耦合机理扩展至多机系统;然后,对频率动态与功角振荡特征分析,采用典型特性量化获取频率动态指标和功角振荡指标,将频率动态与功角振荡间耦合程度量化,提出耦合强度指标;最后,搭建 IEEE 39 节点系统仿真模型,设置负荷扰动,计算频率动态与功角振荡耦合强度指标,评估频率动态指标与功角振荡指标的耦合强度,验证了频率动态与功角振荡之间存在耦合关系。文中提出的指标体系能对耦合特征量化,可为后续开展双高电力系统频率动态和功角振荡耦合分析奠定理论基础。

## 1 频率动态与功角振荡的耦合特性

### 1.1 耦合现象

电网受扰动时,各机组承担的功率缺额依据机组位置与扰动位置间电气距离进行分配,通常电气距离与机组承担功率缺额呈反比,即距扰动点越近的机组应承担更多功率缺额。考虑到各机组调速能力不同,各机组承担的功率缺额有所不同,扰动后各机组的转速变化存在差异,发电机组间转速很难出现同步变化,各节点的频率出现差异。

频率动态过程中通常伴随功角振荡。频率动态过程反映发电机组的转速调整过程,电网的功角振荡会导致发电机组输出电磁功率发生变化,影响电网频率动态,二者相互耦合。

### 1.2 耦合机理分析

对图 1 所示二机系统进行分析,两端机组为等效机组模型。 $E'_1$ 、 $E'_2$  分别为机组 1 和 2 的内电势; $\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别为机组 1 和 2 的功角; $P_e$  为机组输出功率; $X_L$  为线路等值电抗; $R_{L1}$ 、 $R_{L2}$ 、 $\Delta R_L$  分别为区域 1 负荷、区域 2 负荷及突增负荷的等值电阻。忽略电机内部电磁暂态效应,设负荷为恒阻抗负荷。发电机  $G_1$  及负荷  $L_1$  构成区域 1,发电机  $G_2$  及负荷  $L_2$  构

成区域 2,正常运行方式下,区域 1 向区域 2 供电。 $t_0$  时刻,区域 2 发生功率扰动。

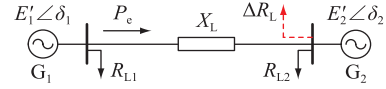


图 1 二机系统模型

Fig.1 Two-machine system model

扰动发生前,机组转子运动方程如式(1)~式(4)所示。

$$\begin{cases} \frac{d\delta_1}{dt} = \Delta\omega_1\omega_0 \\ H_{J1} \frac{d\Delta\omega_1}{dt} = P_{m1} - P_{e1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{d\delta_2}{dt} = \Delta\omega_2\omega_0 \\ H_{J2} \frac{d\Delta\omega_2}{dt} = P_{m2} - P_{e2} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{e1} = E_1'^2 G_{11} + E_1' E_2' (G_{12} \cos \delta_{12} + B_{12} \sin \delta_{12}) \quad (3)$$

$$P_{e2} = E_2'^2 G_{22} + E_1' E_2' (G_{12} \cos \delta_{12} - B_{12} \sin \delta_{12}) \quad (4)$$

式中: $\delta_{12}$ 为机组 1 和 2 的功角差; $\omega_0$ 为系统的基准频率; $\Delta\omega_1$ 、 $\Delta\omega_2$ 分别为机组 1 和 2 转子转速偏移量; $P_{m1}$ 、 $P_{m2}$ 分别为机组 1 和 2 原动机输出的机械功率; $P_{e1}$ 、 $P_{e2}$ 分别为机组 1 和 2 输出电磁功率; $H_{J1}$ 、 $H_{J2}$ 分别为机组 1 和 2 的机械启动时间; $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $H_{J1}$ 和  $H_{J2}$ 为有名值,其余变量为标么值。 $G_{11}$ 、 $G_{12}$ 、 $G_{22}$ 和  $B_{12}$ 为导纳矩阵元素。

假设  $P_{m1}$ 、 $P_{m2}$ 、 $E_1'$  和  $E_2'$  恒定不变, $H_{J1} = 3H_{J2}$ ,设两机组转速差为  $\Delta\omega_{12} = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_2$ ,突发扰动后,其  $\Delta\omega_{12}$  变化规律如式(5)和式(6)所示。

$$\frac{d\Delta\omega_{12}}{dt} = P_M + \frac{E_2'^2}{H_{J2}\Delta R_L} - P_E \quad (5)$$

$$\frac{d\delta_{12}}{dt} = \Delta\omega_{12}\omega_0 \quad (6)$$

其中:

$$P_M = \frac{P_{m1}}{H_{J1}} - \frac{P_{m2}}{H_{J2}} - \frac{E_1'^2}{H_{J1}\Delta R_{L1}} + \frac{E_2'^2}{H_{J2}\Delta R_{L2}} \quad (7)$$

$$P_E = \left( \frac{1}{H_{J1}} + \frac{1}{H_{J2}} \right) \frac{E_1' E_2'}{X_L} \sin \delta_{12} \quad (8)$$

式中: $P_M$ 为系统等效冗余功率; $P_E$ 为系统等效振荡功率。

突发扰动后,发电机转速变化如图 2 所示。由图 2 和图 3 可知,两台发电机组转速呈交替下降趋势,为便于理解,将其划分为 3 个阶段进行分析。

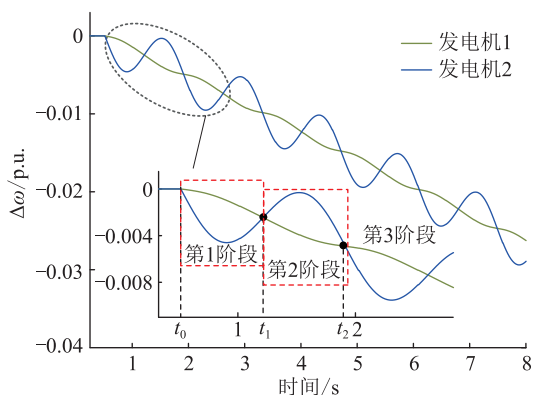


图2 不考虑调速器响应的  $\Delta\omega$  曲线

Fig.2  $\Delta\omega$  variation curves after disturbance ignoring governor response

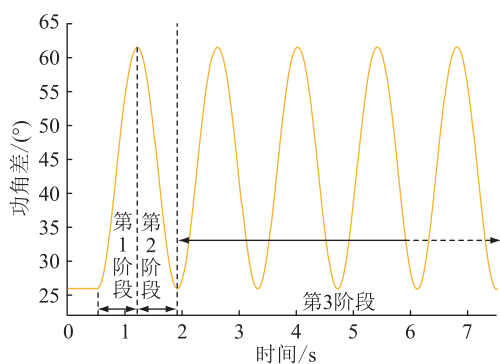


图3 不考虑调速器响应机组功角差曲线

Fig.3 Angle different variation curves after disturbance ignoring governor response

第1阶段为下摆阶段,在区域2发生扰动后,系统机组出力小于负荷出力,出现功率缺额,因  $P_{m1}$ 、 $P_{m2}$  为常数,原动机机械功率不变,机组1和机组2频率开始下降。在变化过程中,区域1向区域2输送功率,机组1频率持续降低,机组2频率先降低后升高,机组1和机组2间频率惯性向中心靠拢,第1阶段末尾二者频率达到一致。初始  $t_0$  时刻,机组间  $\frac{d\Delta\omega_{12}}{dt} > 0, \frac{d\Delta\omega_2}{dt} < \frac{d\Delta\omega_1}{dt} < 0$ , 功角差  $\delta_{12}$  有增大趋势,其变化规律如图4所示。

由图4中可知,功角振荡过程中,功角差  $\delta_{12}$  有最大值且小于  $180^\circ$ 。由式(5)可知,转速差  $\Delta\omega_{12}$  先增大后减小,在该阶段内发电机组2的转速始终小于等于发电机组1的转速。

当功角差  $\delta_{12}$  满足  $P_{m2} - P_{e2} = 0$  时,第1阶段过程中的机组2频率达到最小值,为频率响应的局部最小值点,同时为扰动发生系统初期频率最低点。

第2阶段为上摆阶段,该阶段可作第1阶段的逆过程。在第2阶段初始时刻机组1与机组2转速相同,转速差  $\Delta\omega_{12} < 0$ ,发电机2转速领先发电机1,

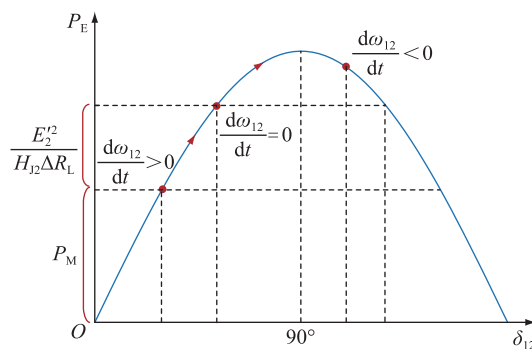


图4 机组功角差变化轨迹

Fig.4 Trajectory of angle difference

功角差  $\delta_{12}$  逐渐减小。由式(5)和式(6)可得式(9)。

$$P_M + \frac{E_2'^2}{H_{12}\Delta R_L} - \left(\frac{1}{H_{J1}} + \frac{1}{H_{J2}}\right) \frac{E_1'E_2'}{X_L} (\sin \delta_{12}) d\delta_{12} = \Delta\omega_{12}\omega_0 d\Delta\omega_{12} \quad (9)$$

对式(9)方程两侧同时积分可得式(10)。

$$\left(P_M + \frac{E_2'^2}{H_{12}\Delta R_L}\right) \delta_{12} + \left(\frac{1}{H_{J1}} + \frac{1}{H_{J2}}\right) \frac{E_1'E_2'}{X_L} \cos \delta_{12} = \frac{1}{2} \Delta\omega_{12}^2 \omega_0 + C \quad (10)$$

初始  $t_0$  时刻  $\Delta\omega_{12}(t_0) = 0$ , 功角差为  $\delta_{12}(t_0)$ , 将  $\Delta\omega_{12}(t_2)$  ( $t_2$  为第二阶段两台机组转速相等时刻) 代入式(10)可得  $\delta_{12}(t_2) = \delta_{12}(t_0)$ 。该阶段中机组2的转速始终小于等于机组1的转速,机组1和2间频率惯性中心再次靠拢,二者频率再次达到一致。

第3阶段为钟摆振荡阶段,将周期性地重复第1、第2阶段的变化过程,机组转速将持续下降,存在振荡过程。

在实际电网运行中,调速器响应具有一定延时光,在扰动后1s左右,其对机组频率影响在分析时无法忽略,其变化规律如图5—图7所示。

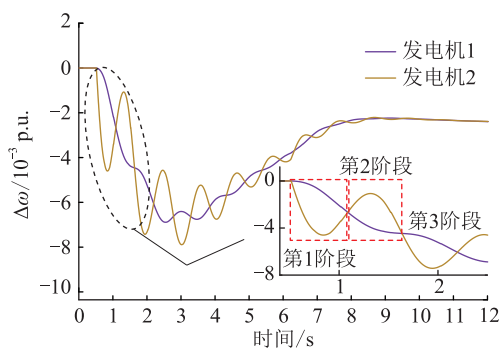


图5 扰动后  $\Delta\omega$  变化曲线

Fig.5  $\Delta\omega$  variation curves after disturbance

由图5和图6可知,电网中发电机组转速及功角差变化在三阶段变化基础上增加了振荡阻尼,本质仍为三阶段变化过程。图7为机组第1、第2阶

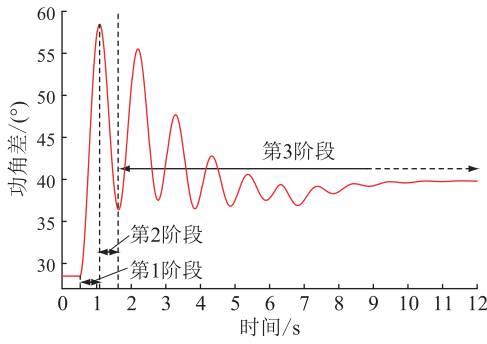
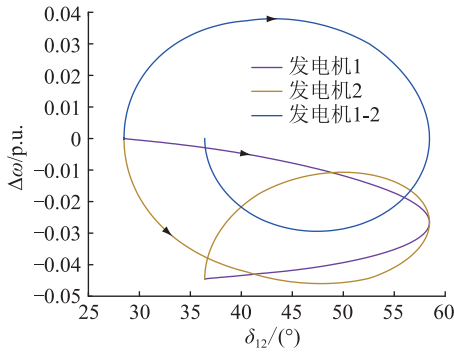


图6 扰动后电网机组功角差变化曲线

Fig.6 Angle different variation curves after disturbance

图7 扰动后机组第1、第2阶段  $\delta_{12}$ - $\Delta\omega$  运动轨迹Fig.7 Variation trajectory of first and second stages  $\delta_{12}$ - $\Delta\omega$  after disturbance

段机组相轨迹图。

### 1.3 基于 EEAC 的多机系统推广

在对实际多机系统分析时,采用双机等值的思想将多机系统转换为两机系统分析,对机组进行分群,惯性中心频率振荡剧烈的机群为 A 群,另一机群为 B 群,得到主导功率联络线以及等效扰动负荷。两机组等效机组特性如式(11)和式(12)所示。

$$\begin{cases} \omega_A = \left( \sum_{i \in M} H_{ji} \omega_i \right) / \sum_{i \in M} H_{ji} \\ \delta_A = \left( \sum_{i \in M} H_{ji} \delta_i \right) / \sum_{i \in M} H_{ji} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \omega_B = \left( \sum_{j \in N} H_{lj} \omega_j \right) / \sum_{j \in N} H_{lj} \\ \delta_B = \left( \sum_{j \in N} H_{lj} \delta_j \right) / \sum_{j \in N} H_{lj} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\delta_i$ 、 $\omega_i$ 、 $H_{ji}$ 分别为 A 机群中第  $i$  台发电机功角、转速和惯性时间常数; $\delta_j$ 、 $\omega_j$ 、 $H_{lj}$ 分别为 B 机群中第  $j$  台发电机功角、转速和惯性时间常数;下标 A 和 B 为各机组所属的机群; $M$  为发电机组集合,包括所有属于 A 机群的发电机组; $N$  为发电机组集合,包括所有属于 B 机群的发电机组。

等值系统模型如式(13)所示。

$$\begin{cases} \frac{d\delta_A}{dt} = \Delta\omega_A \omega_0 \\ H_{JA} \frac{d\Delta\omega_A}{dt} = P_{mA} - P_{eA} \\ \frac{d\delta_B}{dt} = \Delta\omega_B \omega_0 \\ H_{JB} \frac{d\Delta\omega_B}{dt} = P_{mB} - P_{eB} \\ P_{mA} = \sum_{i \in M} P_{mi} \\ P_{mB} = \sum_{j \in N} P_{mj} \\ P_{eA} = -P_{eB} = \frac{E_A E_B}{X_{eq}} \sin \delta_{AB} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $H_{JA}$ 、 $H_{JB}$ 分别为机群 A 和 B 的等值惯量; $P_{mA}$ 、 $P_{mB}$ 分别为机群 A 和 B 的等值驱动功率; $P_{eA}$ 、 $P_{eB}$ 分别为机群 A 和 B 的等值制动功率; $E_A$ 、 $E_B$ 分别为 A 机群和 B 机群等效电压; $X_{eq}$ 为等效传输阻抗。

采用 EEAC 确定的多机系统等效模型具有普适性,能够适用于现有的电网场景分析运算。

## 2 耦合特性量化指标

频率动态-功角振荡耦合特性分析框架如图 8 所示,分析流程可分为两步:频率动态与功角振荡特征的量化和耦合特性的量化分析。首先,对不同时空尺度下频率动态与功角振荡特征进行量化,构建功角振荡特征指表和频率动态特征指标。其次,依据构建指标进行耦合特性量化分析,基于频率动态与功角振荡特征量化指标,分析二者间耦合特征,评估二者的耦合强度。

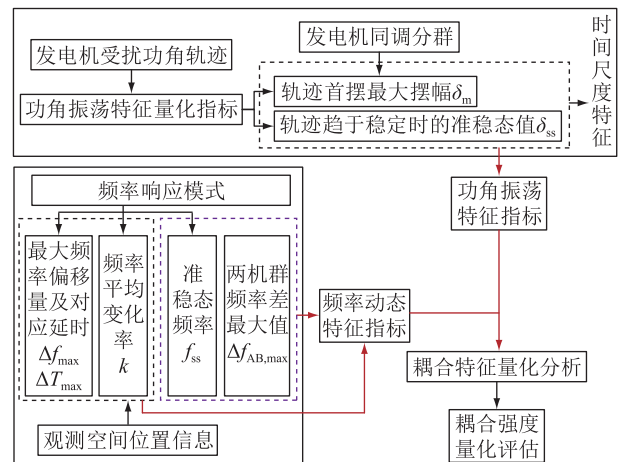


图8 频率动态-功角振荡耦合特性分析框架

Fig.8 Analysis framework of frequency dynamic and angle oscillation coupling characteristics

### 2.1 功角振荡特性量化指标

功角振荡过程如图 9 所示,将分为首摆阶段和首摆后趋于稳定阶段,量化功角振荡特征。

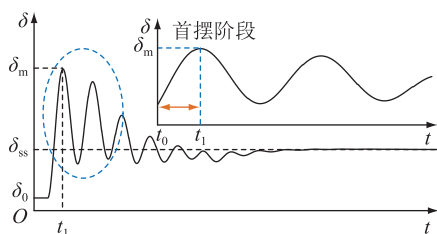


图 9 扰动后发电机功角差变化轨迹

Fig.9 Trajectory of angle difference after disturbance

(1) 首摆摆幅。首摆摆幅  $\Delta\delta_m$  能够直接反映系统受扰动后,机组间功角偏移程度。

$$\Delta\delta_m = \delta_m - \delta_0 \quad (14)$$

式中: $\delta_m$ 为扰动后,系统中机组间功角偏移达到最大值,即首摆位置; $\delta_0$ 为系统扰动前机组间功角差。

(2) 振荡周期。系统发生扰动后,功角振荡速率快慢可由振荡周期表征,在分析时主要考虑首摆振荡过程,振荡周期可根据首摆振荡时间近似计算,如式(15)所示。

$$\Delta T_D = 2(t_1 - t_0) \quad (15)$$

式中: $t_1$ 为达到首摆位置时刻; $t_0$ 为扰动时刻。

(3) 准稳态功角变化值。准稳态功角变化值为扰动前后机组运行点的位置偏移程度,能够反映系统的稳定运行能力,如式(16)所示。

$$\Delta\delta_{ss} = \delta_{ss} - \delta_0 \quad (16)$$

式中: $\delta_{ss}$ 为大扰动后机组间稳态功角差。

### 2.2 频率动态特征指标

对频率动态特征分析,考虑到频率变化率  $k$  能够反映机组频率变化快慢;频率最大偏移量  $\Delta f_{\max}$  反映扰动后机组频率最大偏移值;频率最大偏移量对应的延时量  $\Delta T_{\max}$  反映系统失稳速率;准稳态频率  $f_{ss}$  反映系统稳定运行新位置;机组间频率差  $\Delta f_{AB, \max}$  反映扰动后机组间频率动态离散程度,频率动态特征指标如式(17)所示。

$$\begin{cases} k = \frac{\Delta f_{\max 1}}{\Delta T_{\max 1}} \\ \Delta f_{\max} = f_0 - f_{\min} \\ f_{ss} = f_0 - f'_0 \\ \Delta f_{AB, \max} = \max |f_A(t) - f_B(t)| \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\Delta f_{\max 1}$ 为系统频率在首摆阶段局部最小值点; $\Delta T_{\max 1}$ 为系统频率达到首摆阶段局部最小值点对应的延时量; $f_0$ 为发生扰动前系统稳态频率值; $f_{\min}$ 为振荡过程中频率最小值; $f'_0$ 为发生扰动系统稳定后

系统频率变化量; $f_A(t)$   $f_B(t)$ 分别为 A 机群和 B 机群惯性中心频率。

### 2.3 耦合强度评估指标

频率动态与功角振荡指标耦合程度分析问题为离散变量相关性分析问题,文中采用相关系数法进行问题分析。常用的相关系数有:Pearson 相关系数、Kendall 相关系数和 Spearman 相关系数等。考虑到 Pearson 相关系数具备计算速度快,鲁棒性强的特点,采用 Pearson 相关系数法对功角振荡与频率动态的耦合程度进行分析,得到指标间的线性耦合关系,分析结果绝对值越接近于 1,说明相关度越高,结果正负分别表示正相关性与负相关性。

Pearson 相关系数计算如式(18)所示。

$$r = \frac{\sum_{g=1}^n (x_g - \bar{x})(y_g - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{g=1}^n (x_g - \bar{x})^2 \sum_{g=1}^n (y_g - \bar{y})^2}} \quad (18)$$

式中: $n$ 为样本数量; $x_g$ 、 $y_g$ 为样本  $g$  的特征变量; $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 为样本均值; $r$ 的值域为 $[-1, 1]$ 。

根据先验条件,将 $|r|$ 在 $[0, 1]$ 区间内划分 6 个区段表示  $x_g$  和  $y_g$  间的相关程度,划分结果见表 1。

表 1 Pearson 系数与相关程度

Table 1 Pearson coefficient and correlation degree

$r$	线性相关程度
$r = 0$	完全不相关
$0 <  r  \leq 0.3$	轻微相关
$0.3 <  r  \leq 0.5$	中度相关
$0.5 <  r  \leq 0.8$	显著相关
$0.8 <  r  < 1$	高度相关
$ r  = 1$	严格线性相关

### 2.4 耦合强度评估矩阵

依据上述提出的指标,提出两机群系统间功角振荡指标矩阵  $\mathbf{P}$  和频率动态指标矩阵  $\mathbf{F}$  分别如式(19)和式(20)所示。

$$\mathbf{P} = [\Delta\delta_m \quad \Delta T_D \quad \Delta\delta_{ss}] \quad (19)$$

$$\mathbf{F} = [k_A \quad \Delta f_{\max A} \quad \Delta T_{\max A} \quad k_B \quad \Delta f_{\max B} \quad \Delta T_{\max B} \quad \Delta f_{\max AB} \quad f_{ss}] \quad (20)$$

式中: $k_A$ 、 $k_B$ 分别为机群 A 和机群 B 的频率变化率; $\Delta f_{\max}$ 、 $\Delta f_{\max B}$ 分别为机群 A 和机群 B 的频率最大偏移; $\Delta T_{\max A}$ 、 $\Delta T_{\max B}$ 分别为机群 A 和机群 B 的频率最大偏移量对应的延时量。

两机群耦合强度评估矩阵如式(21)所示。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{a1} \\ \vdots & r_{lm} & \vdots \\ r_{1b} & \cdots & r_{ab} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中: $a$  为功角振荡指标矩阵  $\mathbf{P}$  的列数; $b$  为频率动态指标矩阵  $\mathbf{F}$  的列数; $r_{lm}$  为  $\mathbf{P}$  第  $l$  列元素和  $\mathbf{F}$  第  $m$  列元素的耦合强度。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例参数设定

以改进的英格兰 IEEE 39 节点系统为算例仿真分析。节点 16、17 间线路因维修需要断开连接。对系统等效分析,视为两机群,A 机群包括 G1、G2、G3、G8、G9 和 G10 号 6 台发电机,依次在各机组设置观测点 1—6,B 机群包括 G4、G5、G6 和 G7 号 4 台发电机,依次在各机组设置观测点 7—10。两机群通过节点 15 和 16 相连,仿真系统模型见图 10。

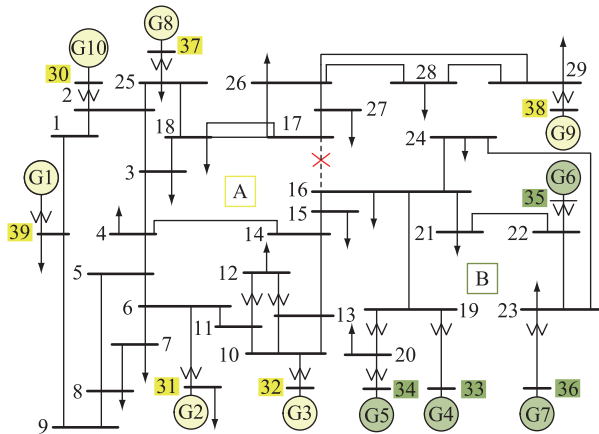


图 10 改进的新英格兰 10 机 39 节点系统  
Fig.10 Modified New England 10-machine and 39-bus system

#### 3.2 频率动态-功角振荡耦合强度计算

##### 3.2.1 负荷突增

扰动时刻为 0.5 s,扰动位置为节点 20 与节点 23,负荷增量为(100 MW,300 MW)、(200 MW,300 MW)、(200 MW,400 MW)、(500 MW,300 MW)、

(500 MW,500 MW)、(500 MW,700 MW)、(700 MW,700 MW)、(900 MW,900 MW),依次为模式 1—8。负荷扰动为(700 MW,700 MW)时,各观测点频率及惯性频率中心变化分别如图 11、图 12 所示。

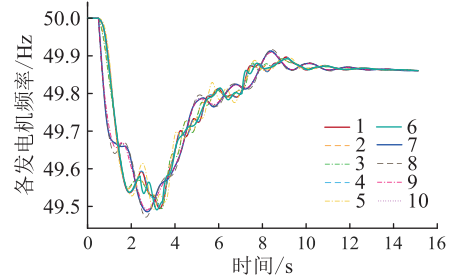


图 11 负荷突增时各观测点频率曲线

Fig.11 Frequency curves of each observation point for the load surge

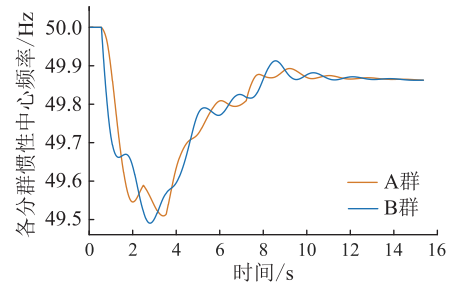


图 12 负荷突增时各机群频率曲线

Fig.12 Frequency curves of each machine cluster for the load surge

在进行耦合特性分析时,部分机组频率动态过程相近,文中在 10 个观测点中选择 7 个典型观测点(观测点 1,3,5,6,8,9 和 10)展示仿真结果,重点关注分群后频率动态指标与功角振荡指标耦合关系。功角振荡指标及单机频率动态指标值见表 2、表 3。

$\Delta\delta_m$  与  $\Delta\delta_{ss}$  随扰动量增大过程变化规律相同,由式(5)和式(10)可知,负荷水平增加,其等效阻抗表

表 2 各机群功角振荡指标与频率动态指标变化情况

Table 2 Indexes of angle oscillation and frequency dynamic of each machine cluster

指标	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4	模式 5	模式 6	模式 7	模式 8	
功角振荡指标	$\Delta\delta_m/(\circ)$	11.350	14.620	17.810	24.780	29.403	36.280	44.170	63.060
	$\Delta T_D/s$	1.730	1.750	1.750	1.780	1.670	1.730	1.790	2.020
	$\Delta\delta_{ss}/(\circ)$	9.820	12.380	14.800	18.980	24.000	29.220	34.880	46.590
A 群惯性中心	$k_A/(Hz \cdot s^{-1})$	-0.064	-0.073	-0.088	-0.101	-0.121	-0.138	-0.151	-0.176
	$\Delta f_{maxA}/Hz$	0.104	0.129	0.154	0.250	0.333	0.401	0.496	0.633
	$\Delta T_{maxA}/s$	1.180	1.200	1.200	2.710	1.300	1.372	2.810	1.800
B 群惯性中心	$k_B/(Hz \cdot s^{-1})$	-0.179	-0.235	-0.302	-0.423	-0.544	-0.665	-0.787	-1.011
	$\Delta f_{maxB}/Hz$	0.098	0.120	0.142	0.270	0.361	0.436	0.515	0.782
	$\Delta T_{maxB}/s$	1.800	1.840	1.860	2.080	1.960	2.061	2.203	2.490
AB 群	$f_{ss}/Hz$	49.965	49.961	49.957	49.909	49.893	49.878	49.864	49.799
	$\Delta f_{AB,max}/Hz$	0.071	0.080	0.104	0.138	0.156	0.200	0.221	0.285

表3 各观测点功角振荡指标与频率动态指标变化情况

Table 3 Indexes of angle oscillation and frequency dynamic of each observation point

指标	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4	模式 5	模式 6	模式 7	模式 8	
功角振荡 指标	$\Delta\delta_m/(\circ)$	11.350	14.620	17.810	24.780	29.403	36.280	44.170	63.060
	$\Delta T_D/s$	1.730	1.750	1.750	1.780	1.670	1.730	1.790	2.020
	$\Delta\delta_{ss}/(\circ)$	9.820	12.380	14.800	18.980	24.000	29.220	34.880	46.590
观测点 1	$k_i/(Hz \cdot s^{-1})$	-0.057	-0.062	-0.072	-0.083	-0.097	-0.110	-0.119	-0.135
	$\Delta f_{maxi}/Hz$	0.105	0.131	0.156	0.255	0.339	0.405	0.506	0.646
	$\Delta T_{maxi}/s$	1.160	1.160	1.170	1.380	1.300	1.340	2.800	2.750
观测点 3	$k_i/(Hz \cdot s^{-1})$	-0.057	-0.118	-0.141	-0.168	-0.204	-0.238	-0.264	-0.314
	$\Delta f_{maxi}/Hz$	0.102	0.126	0.151	0.254	0.325	0.393	0.506	0.648
	$\Delta T_{maxi}/s$	1.200	1.200	1.190	2.701	1.330	1.330	2.880	2.250
观测点 5	$k_i/(Hz \cdot s^{-1})$	-0.063	-0.066	-0.065	-0.068	-0.069	-0.074	-0.081	-0.087
	$\Delta f_{maxi}/Hz$	0.107	0.132	0.157	0.262	0.334	0.407	0.508	0.690
	$\Delta T_{maxi}/s$	1.079	1.080	1.101	1.520	1.210	1.440	2.510	1.780
观测点 6	$k_i/(Hz \cdot s^{-1})$	-0.048	-0.054	-0.072	-0.085	-0.099	-0.112	-0.118	-0.138
	$\Delta f_{maxi}/Hz$	0.104	0.129	0.155	0.257	0.336	0.404	0.509	0.647
	$\Delta T_{maxi}/s$	1.220	1.220	1.220	1.210	1.300	1.360	2.670	1.950
观测点 8	$k_i/(Hz \cdot s^{-1})$	-0.157	-0.218	-0.308	-0.575	-0.602	-0.633	-0.888	-1.149
	$\Delta f_{maxi}/Hz$	0.109	0.127	0.156	0.278	0.373	0.458	0.529	0.792
	$\Delta T_{maxi}/s$	1.870	1.890	0.750	2.150	1.991	2.020	2.160	2.490
观测点 9	$k_i/(Hz \cdot s^{-1})$	-0.243	-0.260	-0.363	-0.339	-0.536	-0.746	-0.791	-1.029
	$\Delta f_{maxi}/Hz$	0.101	0.118	0.143	0.269	0.355	0.428	0.510	0.770
	$\Delta T_{maxi}/s$	1.430	1.490	1.440	2.020	1.980	2.090	2.190	2.500
观测点 10	$k_i/(Hz \cdot s^{-1})$	-0.250	-0.263	-0.367	-0.347	-0.529	-0.725	-0.757	-0.980
	$\Delta f_{maxi}/Hz$	0.100	0.118	0.141	0.272	0.357	0.422	0.509	0.781
	$\Delta T_{maxi}/s$	1.370	1.640	1.410	1.950	1.890	2.111	2.260	2.480

现为减小,系统频率首摆过程中最低点降低,功角振荡程度加剧,稳定时机组 1 向机组 2 传输功率增大, $\delta_{ss}$ 增大。 $\Delta T_D$ 先基本保持不变,而后突降并随着扰动量增大而不断增大,这是由于  $\Delta\delta_m$ 较小时,振荡周期  $\Delta T_D$ 随  $\Delta\delta_m$ 变化很小。采用小扰动分析方法分析,由式(5)和式(6)得线性化方程,如式(22)所示。

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \omega_0\left(\frac{1}{H_{j1}} + \frac{1}{H_{j2}}\right) \frac{E'_1 E'_2}{X_L} \Delta\delta \cos \delta_0 = 0 \quad (22)$$

式中: $\Delta\delta$ 为 $\delta$ 的增量。

$\Delta T_D$ 计算见式(23),可得  $\Delta T_D$ 与功角振荡幅度无关,由初始功角值决定。

$$\Delta T_D = 2\pi / \sqrt{\omega_0\left(\frac{1}{H_{j1}} + \frac{1}{H_{j2}}\right) \frac{E'_1 E'_2}{X_L} \cos \delta_0} \quad (23)$$

随着  $\Delta\delta_m$ 增大,小扰动分析方法误差逐渐增大,无法满足分析要求,由式(5)和式(6)可得式(24)。

$$\frac{d^2\delta_{12}}{dt^2} = \left[ P_M + \frac{E_2'^2}{H_{j2}\Delta R_L} - \left(\frac{1}{H_{j1}} + \frac{1}{H_{j2}}\right) \frac{E'_1 E'_2}{X_L} \sin \delta_{12} \right] \times \omega_0 \quad (24)$$

采用数值积分方法,依据式(24)分析得知,功

角到达最大值的时间也不断增大, $\Delta T_D$ 不断增大。依据观测结果,按照式(17)得到两机群惯性中心的频率平均变化率、频率最大偏移及其对应的延时量,结果如表2分群频率动态指标。 $\Delta\delta_m$ 与频率变化率 $k$ 、频率最大偏移量 $\Delta f_{max}$ 、延时量 $\Delta T_{max}$ 和两机群频率差的最大值 $\Delta f_{AB,max}$ 呈正相关,与准稳态频率 $f_{ss}$ 呈负相关。 $\Delta T_D$ 与频率动态特征指标变化无明显相关,耦合程度低。频率动态特征指标与 $\Delta\delta_{ss}$ 的相关性与 $\Delta\delta_m$ 相同, $\Delta\delta_{ss}$ 与频率动态特征指标的耦合强度低于 $\Delta\delta_m$ 。以 $k_A$ 和 $\Delta\delta_m$ 为例,拟合结果见图13。

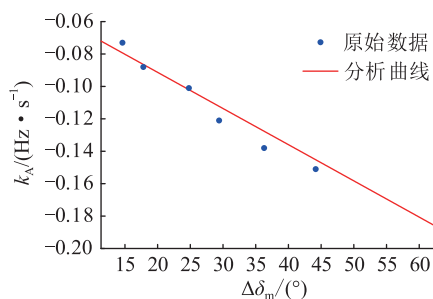


图13  $\Delta\delta_m$ 与频率变化率分析

Fig.13  $\Delta\delta_m$  and rate of change of frequency analysis

通过耦合性分析,可将首摆摆幅滞后于频率变化率的变化特性,时移到同一时刻下进行分析。其余各项指标分析同理,可计算指标间耦合强度,耦合强度评估矩阵为:

$$R_{load} = \begin{bmatrix} -0.974 & -0.620 & -0.985 \\ 0.989 & 0.685 & 0.993 \\ 0.654 & 0.585 & 0.633 \\ -0.992 & -0.688 & -0.997 \\ 0.993 & 0.728 & 0.991 \\ 0.971 & 0.836 & 0.956 \\ -0.981 & -0.711 & -0.977 \\ 0.979 & 0.671 & 0.984 \end{bmatrix}$$

由耦合强度评估矩阵可得,  $\Delta\delta_m$  与除  $\Delta T_{maxA}$ 、 $\Delta T_{maxi}$  外的各频率动态特征指标均呈现线性关系,耦合程度强于  $\Delta T_D$  与  $\Delta\delta_{ss}$ 。导致这一结果的原因为系统在首摆周期内达到频率最低点的时间是由发电机惯性时间常数、调速机惯性时间常数占据主导决定,当负荷增大时,其在首摆周期内达到频率最低点时刻略有增加。 $\Delta T_{maxA}$ 、 $\Delta T_{maxi}$  为频率最大偏移量对应的延时量,在不同运行模式下,其位置会出现在第二振荡周期中,降低了与功角各指标间的耦合性。

### 3.2.2 短路故障

设置三相短路故障 0.5 s 时刻发生,分别经 0.04 s, 0.06 s, 0.1 s, 0.15 s, 0.25 s 和 0.4 s 后切除故障,故障位置为单条输电线路,共计获得 204 种仿真结果。依据仿真结果分析,线路 3-18、线路 17-18 和线路 17-27 故障时,系统符合二机振荡模式,以线路 17-27 故障为例分析,短路 0.04 s 后切除故障情况下机组响应曲线如图 14、图 15 所示。

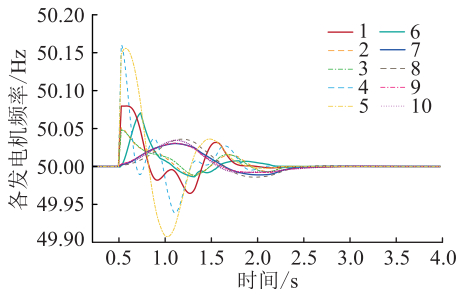


图 14 各观测点频率曲线

Fig.14 Frequency curves of each observation point

机群间的功角角振荡指标变化情况如图 16 所示,选择 7 个典型观测点(观测点 1、3、5、6、8、9、10)的频率动态指标结果进行展示,结果如图 17 所示。

由图 16 分析可得,当发生短路扰动时,若不及时切除故障,系统继续运行过程中,故障量会持续变大,  $\Delta\delta_m$  随切除时间增加而增大。振荡周期  $\Delta T_D$

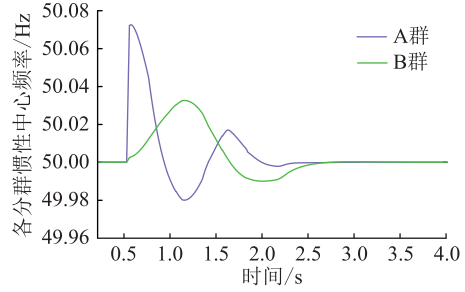


图 15 短路故障时各机群频率曲线

Fig.15 Frequency curves of each machine cluster for the short circuit fault

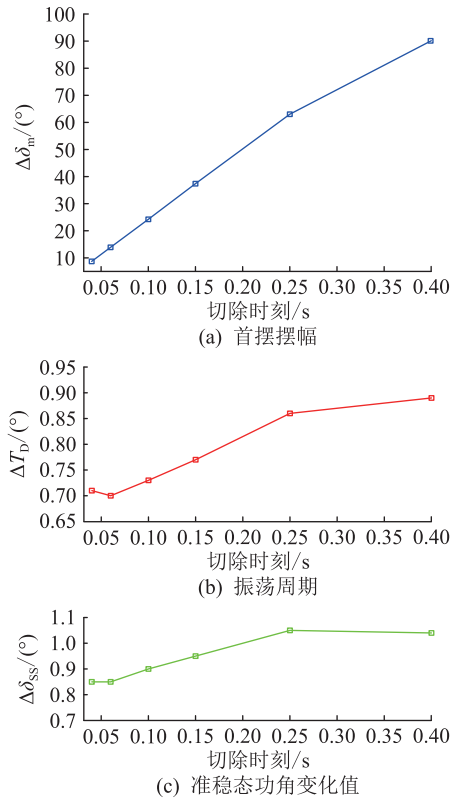


图 16 短路故障时机群间功角振荡指标曲线

Fig.16 Index curves of angle oscillation for the short circuit fault

变化较小,原因为若在短路故障发生后在机组功角振荡未达到首摆最大值之前时间区段内切除故障,随着切除时刻增大,  $\Delta T_D$  有所增加,切除故障时刻越接近首摆最大值时刻,  $\Delta T_D$  增量越少。在切除故障后,系统重新向稳定运行状态靠拢,达到新稳定状态后,功角  $\Delta\delta_{ss}$  由扰动前后拓扑状态决定,与故障切除时间关系较小。扰动后稳态功角  $\delta_{ss}$  与功角  $\delta_0$  大致相同,原因为仅有 1 条输电线路发生改变,拓扑结构变化小,对机群间主导联络线参数影响小,切除故障后机群间交换功率几乎不变。频率动态特征量的变化受首摆幅度  $\Delta\delta_m$  影响程度较大,与稳态功角  $\delta_{ss}$  耦合性小。

由图 17 可知,机组的频率变化率指标值与切除



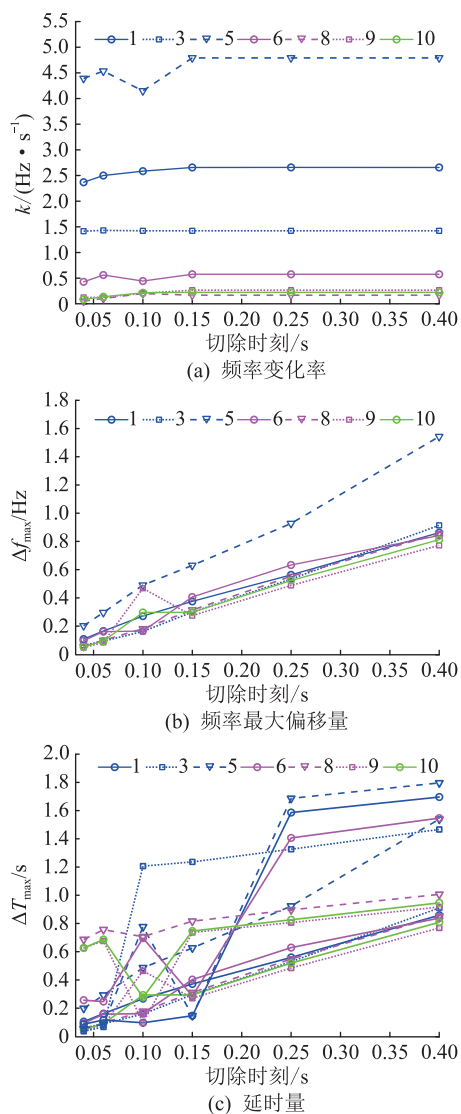


图 17 典型观测点频率动态指标曲线  
Fig.17 Index curves of frequency dynamics at typical observation points

时刻关联性不大;频率最大偏移量随着切除时刻的增加而增加;延时量  $\Delta T_{\max}$  总趋势为随着切除时刻的增加而增加。以机组 5 为例进行分析,延时量  $\Delta T_{\max}$  在切除时刻较小时不具备规律性原因为机组间存在

惯性差异。在 0.1 s 切除故障,系统频率偏差最大值出现在频率动态过程正向第二摆阶段,使得在 0.1 s 切除故障的  $\Delta T_{\max}$  大于 0.15 s 时刻。由以上分析可知,频率动态特征指标与首摆幅度  $\Delta\delta_m$  耦合强度较大。

对机群惯性中心的频率动态指标分析,计算 AB 群的惯性中心频率动态特征指标值,如表 4 所示。在不同时刻切除短路故障后,系统准稳态频率  $f_{ss}$  均为额定频率。

计算频率动态与功角振荡耦合强度,耦合强度评估矩阵为:

$$R_{\text{short}} = \begin{bmatrix} -0.085 & -0.325 & -0.497 \\ 0.995 & 0.577 & 0.373 \\ 0.946 & 0.648 & 0.410 \\ 0.407 & 0.580 & -0.026 \\ 0.999 & 0.789 & 0.407 \\ 0.964 & 0.741 & 0.519 \\ 0.998 & 0.502 & 0.435 \\ -0.629 & -0.589 & -0.463 \end{bmatrix}$$

$\Delta T_D$  与  $\Delta\delta_{ss}$  耦合性差,  $\Delta\delta_m$  与频率动态特征指标耦合强度最高,但与  $k_A$ 、 $k_B$  和  $f_{ss}$  耦合强度较低。造成这一结果的原因为:短路故障类型相同,系统频率变化率与故障切除时刻无关,由短路故障位置决定,系统频率变化率基本不变;系统的准稳态频率  $f_{ss}$  与切除故障后系统拓扑结构有关,与切除时刻无关。

综合上述分析可知,功角振荡指标中首摆摆幅  $\Delta\delta_m$  与频率动态指标耦合强度最大。在不同运行状况下,  $\Delta\delta_m$  与频率动态指标的耦合强度有所差别。上述两种运行情形下,首摆摆幅  $\Delta\delta_m$  与两机群频率动态特征指标  $\Delta f_{\max A}$ 、 $\Delta f_{\max B}$  以及  $\Delta f_{AB, \max}$  耦合强度最大。由此可以得出功角振荡与频率动态特征间存在较强的线性耦合关系。

表 4 扰动后各分群频率动态特征指标

Table 4 Indexes of frequency dynamic of each machine cluster

切除时间	A 群			B 群			AB 群	
	$k_A / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta f_{\max A} / \text{Hz}$	$\Delta T_{\max A} / \text{s}$	$k_B / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta f_{\max B} / \text{Hz}$	$\Delta T_{\max B} / \text{s}$	$f_{ss} / \text{Hz}$	$\Delta f_{AB, \max} / \text{Hz}$
0.04 s	2.138	0.097	0.050	0.084	0.050	0.641	50.000	0.092
0.06 s	2.207	0.144	0.061	0.142	0.090	0.700	49.999	0.137
0.10 s	2.182	0.229	0.110	0.206	0.174	0.740	50.000	0.230
0.15 s	2.275	0.322	0.162	0.225	0.289	0.781	50.001	0.375
0.25 s	2.275	0.482	1.510	0.225	0.512	0.863	49.999	0.623
0.40 s	2.275	0.783	1.653	0.225	0.805	0.970	49.998	0.831

## 4 结论

文中提出电力系统频率动态与功角振荡间耦合强度评估方法。以双机系统为例,分析扰动后系统频率动态与功角振荡的耦合运动机理;基于EEAC将耦合机理扩展至多机系统,扩展结果具有普适性;对频率动态与功角振荡特征分析,量化获取频率动态和功角振荡特征,提出耦合强度指标,分析耦合程度。

采用改进的39节点系统,设置负荷突增和短路故障两种情形,进行仿真分析,计算系统功角振荡和频率动态特征指标,定量评估二者间耦合强度。结果表明,频率动态特征指标与功角振荡特征指标的存在耦合关系,提出的指标体系能对耦合特征量化,为电力系统频率-功角协调控制提供理论基础。

文中研究具有较高的拓展性,基于EEAC可将双机系统理论分析扩展至多机系统,提高理论普适性,为下一步分析电力电子装置的影响,开展双高电力系统频率动态与功角振荡耦合特性提供理论基础。

### 参考文献:

- [1] LEIVA ROCA D A, MERCADO P, SUVIRE G. System frequency response model considering the influence of power system stabilizers[J]. IEEE Latin America Transactions, 2022, 20(6): 912-920.
- [2] JINC C, LI W D, SHEN J K, et al. Active frequency response based on model predictive control for bulk power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3002-3013.
- [3] LI J S, LIU H, LI W Z, et al. Data network traffic analysis and optimization strategy of real-time power grid dynamic monitoring system for wide-frequency measurements[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(2): 131-142.
- [4] 张恒旭,高志民,曹永吉,等.高比例可再生能源接入下电力系统惯量研究综述及展望[J].山东大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1-13.  
ZHANG Hengxu, GAO Zhimin, CAO Yongji, et al. Review and prospect of research on power system inertia with high penetration of renewable energy source[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(5): 1-13.
- [5] 张恒旭,曹永吉,张怡,等.电力系统频率动态行为衍变与分析方法需求综述[J].山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 42-52.  
ZHANG Hengxu, CAO Yongji, ZHANG Yi, et al. Review of frequency dynamic behavior evolution and analysis method requirements of power system[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(5): 42-52.
- [6] 徐科,徐晶,李娟,等.基于暖通负荷集群响应能力的电力系统频率控制策略[J].电力系统及其自动化学报, 2022, 34(3): 37-44.  
XU Ke, XU Jing, LI Juan, et al. Frequency control strategy for power system based on response capability of HVAC load cluster[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(3): 37-44.
- [7] WANG W B, FANG X, CUI H T, et al. Transmission-and-distribution dynamic co-simulation framework for distributed energy resource frequency response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 13(1): 482-495.
- [8] 张怡,张恒旭,李常刚,等.深度学习在电力系统频率分析与控制中的应用综述[J].中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3392-3406, 3665.  
ZHANG Yi, ZHANG Hengxu, LI Changgang, et al. Review on deep learning applications in power system frequency analysis and control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3392-3406, 3665.
- [9] 王凡,李海峰,胥国毅,等.调频关键参数对电网频率特性的影响及其灵敏度分析[J].电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 1-8.  
WANG Fan, LI Haifeng, XU Guoyi, et al. Influence of key parameters of frequency control on frequency characteristics of power grid and sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 1-8.
- [10] 陶仁峰,李凤婷,李燕青,等.基于系统频率响应特征的电网广义旋转备用优化配置[J].电力系统自动化, 2019, 43(9): 82-91.  
TAO Renfeng, LI Fengting, LI Yanqing, et al. Optimal configuration of generalized spinning reserve for power grid based on characteristics of system frequency response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 82-91.
- [11] ZHANG Q Y, XIE J, PAN X P, et al. A short-term optimal scheduling model for wind-solar-hydro-thermal complementary generation system considering dynamic frequency response[J]. IEEE Access, 2021, 9: 142768-142781.
- [12] 张怡,张恒旭,李常刚,等.电力系统频率响应模式及其量化描述[J].中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5877-5887.  
ZHANG Yi, ZHANG Hengxu, LI Changgang, et al. Power system frequency responses pattern and its quantitative analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5877-5887.
- [13] 刘阳,曹毅,赵欣.适用于多直流馈入电网的频率弹性评估方法[J].电力工程技术, 2021, 40(4): 195-199.  
LIU Yang, CAO Yi, ZHAO Xin. Frequency resilience evaluation for multi-HVDC feed-in power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 195-199.
- [14] 袁小明,程时杰,胡家兵.电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J].中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.  
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
- [15] ROSTAMI M, LOTFIFARD S. Scalable coordinated control of energy storage systems for enhancing power system angle sta-

- bility[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2):763-770.
- [16] 盛四清,俞可,张文朝,等. 大规模风电并网对送端系统功角稳定的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6):82-90.
- SHENG Siqing, YU Ke, ZHANG Wenchao, et al. Influence of large-scale wind power grid connection on the power angle stability of the sending end system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6):82-90.
- [17] 郭剑,朱炳铨,徐泰山,等. 基于历史数据聚类分析的暂态功角稳定故障筛选[J]. 电力工程技术, 2020, 39(2):75-80.
- GUO Jian, ZHU Bingquan, XU Taishan, et al. Transient power angle stability contingency screening based on clustering analysis of historical data [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2):75-80.
- [18] 顾卓远,汤涌,易俊,等. 电力系统功角失稳与局部感应电动机失稳相互影响机理分析[J]. 电网技术, 2017, 41(8):2499-2505.
- GU Zhuoyuan, TANG Yong, YI Jun, et al. Study on mechanism of interrelationship between power system angle stability and induction motor stability[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):2499-2505.
- [19] MA J, WANG S X, QIU Y, et al. Angle stability analysis of power system with multiple operating conditions considering cascading failure [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2):873-882.
- [20] 李碧君,刘福锁,吴雪莲,等. 解列后局部电网功角首摆失稳问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12):22-28.
- LI Bijun, LIU Fusuo, WU Xuelian, et al. A study on the first swing of angle instability in the local power network after splitting[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12):22-28.
- [21] 罗魁,石文辉. 面向风电接入暂态功角稳定分析的电网极端运行场景提取[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20):113-120.
- LUO Kui, SHI Wenhui. Extraction of extreme operation scenarios in power grid for transient angle stability analysis under wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20):113-120.
- [22] 黎晓,刘崇茹,辛蜀骏,等. 暂态功角稳定与暂态电压稳定的耦合机理分析与耦合强度评估指标[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15):5091-5107.
- LI Xiao, LIU Chongru, XIN Shujun, et al. Coupling mechanism analysis and coupling strength evaluation index of transient power angle stability and transient voltage stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15):5091-5107.

作者简介:



马睿聪

马睿聪(1999),男,硕士在读,研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail:202114573@mail.sdu.edu.cn);

刘福锁(1981),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统稳定分析与控制相关工作;

曹永吉(1992),男,博士,副研究员,研究方向为电力系统稳定分析与控制、可再生能源并网及储能技术应用。

## Coupling characteristic analysis of power system frequency dynamic and power angle oscillation

MA Rucong<sup>1</sup>, LIU Fusuo<sup>2,3</sup>, CAO Yongji<sup>1,4</sup>, WANG Chao<sup>3</sup>, ZHANG Hengxu<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2,3</sup>

(1. Shandong University (Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education),

Jinan 250061, China; 2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China;

3. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

4. Academy of Intelligent Innovation, Shandong University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** For the analysis of the coupling characteristics of the power system frequency dynamic and power angle oscillation, the mechanism of the two-machine system under disturbances is derived in this paper, and the mechanism of the multi-machine system is obtained based on the extended equal area criterion (EEAC). A quantitative assessment index is proposed based on the Pearson coefficient, which quantified the coupling according to the characteristics of frequency dynamics and power angle oscillation. The influence of power angle oscillation on the frequency dynamic indices is analyzed, and the coupling degrees of between the power angle oscillation and different frequency dynamic indices are assessed quantitatively. The results of the mechanism analysis and case study verify the proposed quantitative indices and show the coupling characteristics of the power system frequency dynamic and power angle oscillation, which provided guidance for optimal frequency and power angle control.

**Keywords:** frequency dynamic; power-angle oscillation; coupling characteristic; quantitative analysis; frequency stability; synchronous stability

(编辑 李栋)