

基于区间联络线能量预测的暂态稳定紧急切机控制

(一)机理与方法

赵晋泉¹, 邓 晖¹, 徐光虎², 张 勇², 吴小辰²

(1. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098;

2. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510623)

摘要: 随着 PMU/WAMS 技术的广泛应用, 基于广域响应的暂态稳定紧急控制技术已成为可能。针对互联电网区间暂态失稳, 分析扰动后区间联络线功率的动态特征及其与系统不平衡能量的关系, 提出一种基于区间联络线能量预测的暂态稳定紧急切机方法。根据扩展等面积法则建立振荡中心所在联络线的功率-相角差相平面, 映射系统暂态能量变化, 并以此计算联络线的紧急调节功率。系统运行中, 根据地区特征发电机的受扰响应刷新切机序位表, 并利用离线计算得到的功率转移分布因子实现在线切机功率分摊计算, 制定基于最小代价的紧急切机策略。所提方法无需健全广域测量, 计算效率高。

关键词: 区间暂态稳定; 广域测量系统; 紧急切机控制; 扩展等面积法则; 功率转移分布因子

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.017

0 引言

合理、有效的暂态稳定紧急控制是电力系统安全稳定防线的核心内容^[1]。现有的电力系统紧急控制通常采用事件驱动的控制技术: 通过离线仿真或者在线预算方式得到对象电网在预想故障下的运行轨迹和稳定性特征, 从而制定针对性的控制措施, 当实际扰动发生后, 通过事件匹配触发相应控制策略。该类方法具有简单、快速、针对性强的特点, 但紧急控制的可靠性依赖于数值仿真的准确性, 且无法应对预想故障外的意外事故^[2]。

随着 PMU/WAMS 的广泛应用, 响应驱动的暂态稳定控制技术已成为可能^[3-5]。该类方法对系统模型参数依赖性小、可应对复杂故障场景, 能够弥补传统方法的不足。现有的研究大多基于发电机功角量测, 采用扩展等面积法则(EEAC)^[6]。文献^[7]将全网发电机等值成单机无穷大系统, 基于等值单机轨迹, 应用广义 Hamilton 理论定量估计所需的紧急控制量, 从而实现在线切机控制决策。文献^[8]提出紧急 EEAC 方法, 根据等值单机功角-不平衡功率相平面轨迹, 采用曲线拟合外推方法预测系统的完整减速面积, 从而估算切机量大小。在此基础上, 文献^[9]以判别失稳时刻机组的动能作为系统加速能量, 通过相平面能量关系估算系统到达不稳定平衡点前需

降低的等值机械功率。文献^[10]则根据等值单机面积积分公式, 通过迭代求解方法计算需降低的等值机械功率。上述方法适用性强, 但依赖于全网发电机的广域响应, 由于广域信息的采集和处理存在不确定性时滞^[11], 这将严重影响控制的时效性。

由于经济发展与能源分布的不平衡, 大型互联电网通常具有远距离、大容量输电的特征。区域电网间联系相对薄弱, 系统暂态过程中区间联络线的受扰特征明显, 易成为振荡中心^[12]。随着暂态稳定性的下降, 系统的暂态势能将集中于振荡中心所在的主振荡支路上, 导致系统的同步运行在该支路“撕开”^[13]。文献^[14]建立振荡中心所在联络线功率及相角差相平面, 以轨迹特征分析方法辨识系统的暂态稳定性。上述分析方法主要针对互联电网区间暂态失稳特征, 所需量测少。

切机控制可以直接减少对象电网的暂态能量, 是主要的紧急控制措施之一。针对互联电网的区间暂态稳定性, 本文从紧急控制能量评估、切机控制序位表制定、切机功率分摊计算三方面入手, 提出一种基于响应的暂态稳定紧急切机方法。该方法不依赖于数值仿真技术, 计算效率较高。

1 基于区间联络线响应的紧急功率调节

1.1 区间联络线的有功功率特征

对于区域互联电网, 当观察到系统发生功率振荡现象时, 根据振荡中心所在的联络断面可将系统划分为两区域系统。假设两子系统间仅由单条区间联络线联接, 子系统 A 为送端电网, 子系统 B 为受端电网, 则可表示为图 1 所示的两区互联系统振荡模式。

收稿日期: 2015-07-06; 修回日期: 2016-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077042); 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室开放课题资助项目(LAPS14005)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077042) and Open Foundation of State Key Lab of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources of North China Electric Power University(LAPS14005)

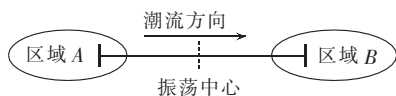


图1 单联络线互联电网区域振荡模式图

Fig.1 Oscillation mode of power systems interconnected by single tie-line

利用转速偏差建立系统内发电机的转子运动方程,如式(1)所示。

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M} (P_m - P_e) \\ \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega\omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, δ 与 ω 分别为发电机功角及角速度; P_m 与 P_e 分别为发电机的机械功率与电磁功率; M 为机组惯性时间常数; ω_0 为系统基准角速度; $\Delta\omega$ 为角速度偏差。

此时,区间联络线A-B的输电功率可表示为:

$$P_{eAB} = \frac{U_A U_B}{X_L} \sin\theta \quad (2)$$

其中, P_{eAB} 为联络线A-B的电磁功率; U_A 和 U_B 分别为送端与受端的电压幅值; X_L 为联络线电抗; θ 为联络线相角差。

假设系统具有较强的电压调节能力,即送端和受端的电压幅值 U_A 和 U_B 变化不大。则振荡中心所在联络线即为系统的主振荡支路^[13]。其有功功率 P_{eAB} 可近似表征为关于联络线相角差 θ 的正弦变化函数^[14]。

1.2 区间联络线功率与系统稳定性

对送端电网A进行戴维南等值,如图2所示。其中, P_{eA} 为系统A的等值发电机电磁功率, P_{eAL} 为系统A的对地支路功率,即负荷有功功率。

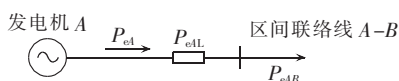


图2 送端电网戴维南等值系统图

Fig.2 Thevenin equivalent system of sending system

当电网受扰后,系统A存在不平衡功率,可表示为:

$$\Delta P_A = \Delta P_{AL} + \Delta P_{AB} \quad (3)$$

其中, ΔP_A 为系统A的发电机暂态不平衡功率; ΔP_{AL} 与 ΔP_{AB} 分别为系统A负荷及联络线A-B的不平衡功率。引起系统暂态失稳的不平衡功率主要由两部分构成:一部分为系统内的负荷不平衡功率;另一部分则是对外联络线的不平衡功率。

若该扰动造成子系统A与B间失步,则区域发电机群相对功角递增,造成区间相角差 θ 增大。由式(2)可知,联络线功率 P_{eAB} 将剧烈波动。此时,系统A的不平衡功率 ΔP_A 由联络线不平衡功率 ΔP_{AB} 主导。若受扰后不平衡功率能够趋于稳定,则子系统间同步运行;反之,电网将暂态失稳。

综上所述,互联电网的区间暂态稳定性主要取

决于子系统之间的相对运动关系^[14],即振荡中心所在联络线的功率变化轨迹。

1.3 基于区间联络线的系统暂态能量评估

EEAC理论的核心是根据受扰轨迹将全网机组分为领先群与滞后群两群,通过两群的相对运动关系变换为映像单机无穷大系统^[6]。对于互联电网区间暂态失稳,通过区间联络线即可将全网进行双机系统映射。此时,系统振荡中心所在的主振荡支路,其支路势能可用于表征全网暂态稳定性^[13]。

根据EEAC理论,建立联络线不平衡功率 ΔP_{AB} -联络线两端相角差 θ 相平面。近似估计双机系统在相对运动过程中的暂态能量变化,如下:

$$\begin{aligned} V_p(t) &= \int_{\delta_0}^{\delta_t} \Delta P_{OMB} d\delta \approx \int_{\theta_0}^{\theta_t} \Delta P_{AB} d\theta \\ V_k(t) &= \frac{1}{2} \omega_0 \Delta\omega^2(t) \\ V(t) &= V_p(t) + V_k(t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, δ 和 ΔP_{OMB} 分别为等值单机系统的功角和不平衡功率; t_0 为系统受扰时刻; $V(t)$ 、 $V_p(t)$ 和 $V_k(t)$ 分别为 t 时刻暂态总能量、暂态势能和暂态动能。

1.4 基于曲线外推的调节功率计算

系统振荡中心位于区间联络线时,两侧电网将由联络线“撕裂”开去。若能尽早地判定系统暂态失稳,可快速调节区间联络线的送电功率,控制振荡系统间的能量变化,以维持全网机组的同步运行。基于联络线能量的紧急控制过程如图3所示。

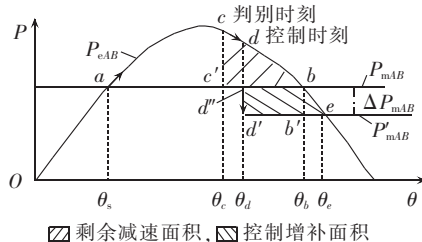


图3 基于联络线功率的紧急功率调节示意图

Fig.3 Schematic diagram of emergency power adjusting based on tie-line power

对于图3中 $\Delta P_{AB}-\theta$ 映像轨迹而言,电网受扰后的加速过程已结束,减速过程由a点开始。若至c点时判定系统暂态失稳,立即发送紧急控制指令。由于通信及控制过程存在时延,系统将在运行点d处完成控制措施,有效降低联络线的送电功率,将机械功率曲线由 P_{mAB} 下降至 P'_{mAB} 。若此时系统的电磁功率轨迹并没有发生较大改变,则系统的不稳定平衡点将由b点延后至e点,控制后增补减速面积如图 $bed'd''$ 所示。在控制后的不稳定平衡点e前,系统若能通过控制增补面积耗散加速能量,区间相角差轨迹 θ 将发生回摆,则电网恢复稳定运行。其中联

络线调节功率 ΔP_{mAB} 的具体计算方法如下。

区间转速偏差的离散计算表达式如下:

$$\Delta\omega(t) = \frac{\theta(t+T) - \theta(t)}{T\omega_0} \quad (5)$$

其中, T 为采样间隔时间。

t_c 时刻判定系统的暂态稳定性, 此时振荡系统的动能可表示为式(6), 即系统加速能量^[10]。

$$V_k(t_c) = \frac{1}{2} \omega_0 \Delta\omega^2(t_c) = \int_{\theta_0}^{\theta_c} (P_{mAB} - P_{eAB}) d\theta \quad (6)$$

由 1.1 节可知, 区间联络线有功功率关于相角差近似为正弦函数。可利用拟合外推方法进行未来时刻的功率轨迹快速估计, 拟合函数如下:

$$\tilde{P}_{eAB}(\theta) = \alpha + \beta \sin(\theta + C) \quad (7)$$

其中, $\tilde{P}_{eAB}$ 为拟合电磁功率; α, β, C 为拟合参数。

利用 t_c 时刻前 P_{eAB} 的历史功率采样数据, 进行拟合参数的最小二乘估计。根据拟合外推轨迹 $\tilde{P}_{eAB}$, 可预测得到未施加紧急控制时系统的剩余减速面积 S_d ^[8], 即图 3 中 bcc' 面积为:

$$S_d = \int_{\theta_c}^{\theta_b} (P_{mAB} - \tilde{P}_{eAB}) d\theta \quad (8)$$

根据系统加速能量及剩余减速面积, 计算得到控制增补面积 S_c 应为:

$$S_c = V_k(t_c) - S_d = \frac{1}{2} \omega_0 \Delta\omega^2(t_c) - \int_{\theta_c}^{\theta_b} (P_{mAB} - \tilde{P}_{eAB}) d\theta \quad (9)$$

由于失稳判别与紧急控制之间存在时延, 且该时延具有不确定性, 造成图 3 中控制时刻运行点 d 不可知。可利用判别时刻 t_c 的转速偏差估计一定时延内运行点的变化, 从而近似估计控制时刻系统的相角差 θ_d ^[9], 如下所示:

$$\theta_d = \theta_c - \Delta\omega(t_c) t_{\text{delay}} \quad (10)$$

其中, t_{delay} 为系统失稳判别与紧急控制间的时延。

由预测功率轨迹 $\tilde{P}_{eAB}$, 通过式(11)可求解得到系统原不稳定平衡点 b 处的相角差 θ_b 。

$$\tilde{P}_{eAB}(\theta_b) = \alpha + \beta \sin(\theta_b + C) = 0 \quad (11)$$

为计算快速, 并为控制量提供一定的裕度, 本文以矩形 $bb'd'd''$ 部分表征 $bed'd''$ 的完整控制增补面积。因此, 联络线调节功率计算方法如下:

$$\Delta P_{mAB} = \frac{S_c}{\theta_b - \theta_d} \quad (12)$$

2 基于暂态动能的切机序位表制定方法

系统暂态过程中, 部分机组在故障时刻由于能量注入而加速运行, 受扰程度相对严重。紧急控制一般优先切除受扰最严重机组, 从而以较小的代价平抑系统加速能量^[15]。

2.1 特征机组受扰程度量化评估

现有的受扰严重机组辨识方法主要有基于机组动能、基于加速功率和基于加速度 3 种^[16]。当前广

域测量技术通常难以准确获取机组的不平衡功率及加速度值, 可直接采集发电机的转速信息。因此, 本文采用基于机组动能的发电机受扰程度量化评估方法。

受扰初期, 利用发电机的相对动能表征该机组的受扰严重程度 S , 如式(13)所示。为实现统一基准下的量化评估, 机组受扰程度指标建立在惯量中心坐标下。

$$S = \frac{1}{2} \omega_0 \Delta\omega^2(t) \quad (13)$$

对于大型互联电网而言, 全网机组数目庞大, 且广域通信具有不确定性时延, 若对全网机组受扰程度进行集中分析, 将严重影响方法的时效性。针对互联电网区间暂态失稳, 由于地区电网的网架结构相对坚固, 各地区内发电机的电气联系紧密, 受扰特征一般具有较强的相似性。

基于上述原因, 本文采用离线仿真选取能够表征各地区电网受扰特征的少量机组, 通过在线分析特征机组的受扰严重程度确定紧急切机对象。

2.2 基于暂态动能变化的切机排序

实际电网中系统的能量时刻在发生重构, 若采用某一时刻机组的动能指标, 进行此后任意时刻的切机对象选择, 可能会对紧急控制的有效性造成较大影响。若采用实时量化评估方式将会带来冗余的信息通信及计算过程。

为解决上述问题, 本文设定受扰观测时间窗, 评估在一定时域内机组的动能改变, 其中增量值较大者即为当前时段内受扰严重机组, 如式(14)所示。

$$S = \Delta V_k = V_k(t + T_o) - V_k(t) = \frac{1}{2} \omega_0 \Delta\omega^2(t + T_o) - \frac{1}{2} \omega_0 \Delta\omega^2(t) \quad (14)$$

其中, T_o 为受扰观测时间窗。

基于特征机组动能的切机序位表制定方法如下: 通过广域测量对地区特征发电机的角速度进行监测。设置受扰观测时窗, 在惯量中心坐标下滚动计算一定时间窗前后的暂态动能变化值。对每次计算得到的机组动能增量进行排序, 制定基于发电机响应的最新切机序位表。当系统失稳时, 以最新的序位表确定切机对象。

3 基于功率转移分布因子的切机分摊方法

联络线的调节功率无法直接表征切机量。因此, 需要建立两者之间的函数关系, 即机组与目标联络线功率的灵敏度。

3.1 发电机功率转移分布因子

在电力系统静态安全分析中, 通常根据直流潮流模型建立发电机有功出力与目标支路有功潮流之间

的线性关系,近似估计发电机-目标支路的有功功率灵敏度。该方法具有信息直观、计算快速、方法简单等特点^[17],在暂态稳定分析与控制方面已获得一定的应用。该方法可用于计算机组对脆弱割集的控制灵敏度,将灵敏度占优机组作为紧急切机控制对象^[18],也可用于估计机电暂态过程中节点注入电流变化对网络潮流分布的影响^[19]。

本文采用静态功率转移分布因子,近似表征暂态下机组对目标联络线的有功功率控制灵敏度。广义功率转移分布因子(GGDF)的计算方法如式(15)所示。

$$D_{lg} = \frac{\mathbf{M}_l^T \mathbf{X}_g}{x_l} + \left(P_i - \sum_{p \neq R} \frac{\mathbf{M}_l^T \mathbf{X}_p}{x_l} P_p \right) / \sum_q P_q \quad (15)$$

其中, D_{lg} 为发电机节点 g 的有功功率改变单位值时,支路 l 的有功潮流变化量; $\mathbf{M}_l^T$ 为支路 l 的节点关联向量; $\mathbf{X}_g$ 为直流潮流矩阵 $\mathbf{B}_0$ 逆矩阵的第 g 个列向量; x_l 为支路 l 的电抗; R 为参考发电机节点; P_i 为发电机节点 i 的有功功率。

GGDF是假定发电机节点的功率变化由负荷按比例承担,即系统总的发电出力不恒定,计算总出力变化时,机组对支路的有功功率灵敏度。该指标符合暂态过程中系统的功率变化方式。

3.2 基于GGDF的切机功率分摊计算

基于功率转移分布因子的切机功率分摊方法如下:通过离线计算获得发电机与区间联络线的GGDF指标。判定系统暂态失稳时,根据1.4节计算得到的联络线调节功率及2.2节获取的切机序位表,利用GGDF估计切除多少机组能够满足目标联络线的功率调节需求,如式(16)所示。

$$D_{lg1} P_{g1} + D_{lg2} P_{g2} + \dots + D_{lgn} P_{gn} > \Delta P_{mAB} \quad (16)$$

其中, n 为所切除发电机总数。

切机控制以单台机组为单位,式(16)将为紧急控制提供更大裕量。满足该式的最小切机方式,即为维持系统暂态稳定的最佳紧急切机策略。

4 多联络线互联电网

实际区域电网间一般存在多条联络线。假设 $A-B$ 区域间共有 k 条联络线,如图4所示。

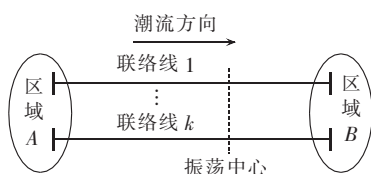


图4 多联络线互联电网区域振荡模式图

Fig.4 Oscillation mode of power systems interconnected by multiple tie-lines

若系统呈现两机失稳模式,一定存在受振荡中心主导的、具有与单联络线互联电网的主振荡支路

相同特性的临界割集,系统暂态势能主要集中于该临界割集区域内^[20]。针对图4所示互联系统,若振荡中心位于区间联络断面,联络线1— k 所构成的输电断面将成为系统临界割集。由于同一输电断面下的各联络线动态参数相近,其受扰轨迹具有较强的同调性。因此,各联络线的能量轨迹可近似表征所在临界割集的整体能量变化特征。

由于区间联络线响应具有同调性,若针对特定联络线进行功率调节时,其余联络线功率均会同比下降。因此,本文对各条区间联络线分别进行暂态稳定控制策略计算,取所有控制策略中切机量最大值作为最终的紧急切机策略。从而保证该紧急控制方案能够将所有联络线功率调节至稳定范围以内,保障区域电网间的同步运行。

5 算法实现

本文提出的基于区间联络线能量的紧急切机方法流程图如图5所示,主要由三部分组成。

(1)联络线调节功率计算:当判定系统暂态失稳

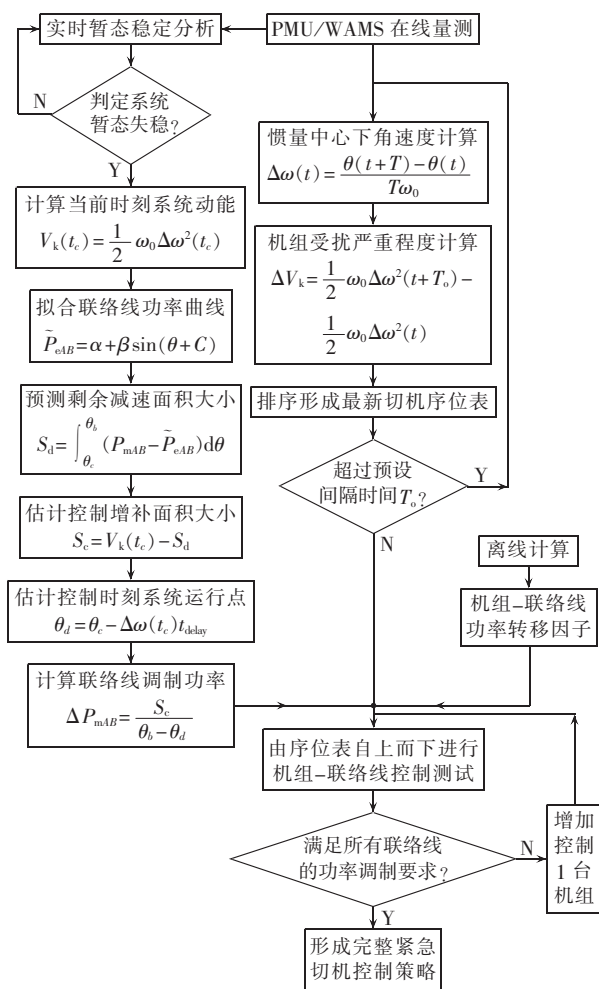


图5 基于广域响应的紧急切机控制方法流程图

Fig.5 Flowchart of emergency generator tripping control based on PMU/WAMS

时,建立联络线有功功率-相角差相平面,估计耗散系统加速能量所需调节的联络线功率。

(2)切机序位表制定:根据一定时间窗前后的发电机动能增量进行机组受扰程度排序,并刷新切机序位表。

(3)切机功率分摊计算:通过离线潮流计算获得机组-联络线功率转移分布因子,制定满足所有区间联络线功率调节需求的紧急切机策略。

通过上述紧急切机策略可降低区间联络断面的送电功率,维持区域电网间的暂态稳定。需要指出的是,若采用本文方法切除的发电机功率较大,为防止电力系统可能运行于低电压或低频率方式,必须同时切除互联电网受电地区部分负荷,以维持全网的安全稳定运行。

6 结论

本文针对互联电网区间暂态失稳,分析了区间联络线功率轨迹与系统不平衡能量的关系,提出了一种基于区间联络线能量估计的紧急切机方法。通过联络线受扰响应建立相平面轨迹,量化估计联络线调节功率。根据特征发电机的受扰量测刷新切机序位表,并通过功率分布转移因子制定紧急切机策略。本文方法所需量测较少,具备工程可实施性。

此外,通过本文方法计算得到的联络线调节功率,还可用于生成切负荷、HVDC 调制等其他紧急控制策略。

参考文献:

- [1] 张保会. 广域动态信息条件下电网安全紧急控制的研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(8):1-8.
ZHANG Baohui. Study on network security, stability and emergency control system based on wide area dynamic information[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(8):1-8.
- [2] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(一)从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):1-9.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(1):1-9.
- [3] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化,2006,30(2):1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(2):1-10.
- [4] 张保会,杨松浩,王怀远,等. 电力系统暂态稳定性闭环控制(二)——多机电力系统暂态不稳定判别方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):1-6.
ZHANG Baohui, YANG Songhao, WANG Huaiyuan, et al. Closed-loop control of power system transient stability(2): transient instability detection method of multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):1-6.
- [5] 张保会,王怀远,杨松浩. 电力系统暂态稳定性闭环控制(七)——实现方案与控制效果[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):1-7.
ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao. Closed-loop control of power system transient stability(7): implementation scheme and control effect[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):1-7.
- [6] XUE Y, CUSTEM T V, PAVELLA M R. Extended equal area criterion justifications, generalizations, applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1989,4(1):44-52.
- [7] 彭疆南,孙元章,程林. 基于受扰轨迹的紧急控制新方法[J]. 电力系统自动化,2002,26(21):17-22.
PENG Jiangnan, SUN Yuanzhang, CHENG Lin. A novel approach for transient stability emergency control based on perturbed trajectory[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(21):17-22.
- [8] 滕林,刘万顺,真志皓,等. 电力系统暂态稳定实时紧急控制的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):64-69.
TENG Lin, LIU Wanshun, YUN Zhihao, et al. Study on real-time power system transient stability emergency control[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(1):64-69.
- [9] 顾卓远,汤涌,张健,等. 基于相对动能的电力系统暂态稳定实时紧急控制方案[J]. 中国电机工程学报,2014,34(7):95-102.
GU Zhuoyuan, TANG Yong, ZHANG Jian, et al. Real-time power system transient stability emergency control scheme based on the relative kinetic energy[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(7):95-102.
- [10] 吴为,汤涌,孙华东. 基于系统加速度能量的切机控制措施量化研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6134-6140.
WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong. Quantitative research of generation capacity tripped based on acceleration energy of power system[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(34):6134-6140.
- [11] 方勇杰. 跨区互联电网紧急控制技术未来发展分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(15):1-5.
FANG Yongjie. Analysis on trends in emergency control technology of cross-regional interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(15):1-5.
- [12] 邓晖,赵晋泉,吴小辰,等. 基于受扰电压轨迹的电力系统暂态失稳判别:(二)算例分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):58-63.
DENG Hui, ZHAO Jinquan, WU Xiaochen, et al. Transient instability detection of power system based on perturbed voltage trajectories: part two case analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(17):58-63.
- [13] 蔡国伟,穆钢,CHAN K W,等. 基于网络信息的暂态稳定性定量分析——支路势能法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):1-6.
CAI Guowei, MU Gang, CHAN K W, et al. Branch potential energy method for power system transient stability assessment based on network dynamic variables[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(5):1-6.
- [14] 吴为,汤涌,孙华东,等. 利用实测响应信息的暂态功角失稳实时判别方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):171-178.
WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Real-time transient instability criterion based on post-disturbance response data[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(34):171-178.

- [15] KAMWA I,GRONDIN R,HEBERT Y. Wide-area measurement based stabilizing control of large power system—a decentralized/hierarchical approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001,16(1):136-153.
- [16] 叶圣永,王晓茹,刘志刚,等. 基于受扰严重机组特征及机器学习方法的电力系统暂态稳定评估[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):46-51.
- YE Shengyong,WANG Xiaoru,LIU Zhigang,et al. Power system transient stability assessment based on severely disturbed generator attributes and machine learning method[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):46-51.
- [17] 顾乃炎,侯志俭. 几种快速确定发电机分配系数的方法[J]. 电网技术,1999,23(6):40-43.
- GU Naiyan,HOU Zhijian. Fast determination methods of generator distribution factors[J]. Power System Technology,1999,23(6):40-43.
- [18] 张剑云,孙元章. 基于脆弱割集选择紧急控制地点的灵敏度分析方法[J]. 电网技术,2005,29(8):30-34.
- ZHANG Jianyun,SUN Yuanzhang. A vulnerable cutsets based sensitivity analysis method for locating emergency controls[J]. Power System Technology,2005,29(8):30-34.
- [19] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等. 计及暂态过程的多支路切除潮流转移识别算法研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(16):24-30.

XU Huiming,BI Tianshu,HUANG Shaofeng,et al. Flow transferring identification algorithm for multi-branches removal event with consideration of transient phenomena[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(16):24-30.

- [20] 蔡国伟,孟祥霞,刘涛. 电力系统振荡中心的暂态能量解析[J]. 电网技术,2005,29(8):30-34.

CAI Guowei,MENG Xiangxia,LIU Tao. Study on transient energy around power system oscillation center[J]. Power System Technology,2005,29(8):30-34.

作者简介:



赵晋泉

赵晋泉(1972—),男,山西阳泉人,教授,博士,通信作者,主要从事电力系统优化运行、电压稳定分析与控制和电力市场等方面的研究工作(E-mail:jqzhao2@tom.com);

邓晖(1986—),男,浙江杭州人,博士研究生,主要从事电力系统暂态稳定分析与控制方面的研究工作;

徐光虎(1974—),男,安徽合肥人,高级工程师,博士,主要从事电力系统暂态稳定分析与控制方面的工程应用工作。

Transient stability emergency generator tripping control based on tie-line energy prediction

Part one:theory and method

ZHAO Jinqun¹,DENG Hui¹,XU Guanghu²,ZHANG Yong²,WU Xiaochen²

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering,Ministry of Education,Hohai University, Nanjing 210098,China;2. China Southern Power Grid Co.,Ltd.,Guangzhou 510623,China)

Abstract: With the wide application of PMU/WAMS,the transient stability emergency control technology based on wide-area response has become possible. Aiming at the inter-area transient instability between regional power grids,the dynamic characteristics of inter-area tie-line power and its relationship with the unbalanced system energy are analyzed,and a method of transient stability emergency generator tripping based on the inter-area tie-line energy prediction is proposed. According to the extended equal area criterion,the tie-line phase plane of power and angle difference in the oscillation centre is established to reflect the variation of system transient energy and calculate the emergency adjusting power of tie-line. During the system operation,the generator tripping sequence table is updated according to the response of generator to disturbance,the power allocation of on-line generator tripping is calculated based on the generalized generation distribution factors obtained by off-line calculation,and the emergency generator tripping scheme with the minimum cost is set. The proposed method does not depend on the complete wide-area measurements and has high computation efficiency.

Key words: inter-area transient stability; PMU/WAMS; emergency generator trip; EEAC; GGDF