

DOI: 10.7667/PSPC151770

适应主导薄弱断面迁移的暂态稳定控制

苗田¹, 郑超², 马世英², 刘观起¹, 柯贤波³, 牛栓保³, 宋云亭²

(1. 华北电力大学(保定), 河北 保定 071003; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;

3. 西北电网有限公司, 陕西 西安 710048)

摘要: 为适应电网大扰动冲击下, 表征机群主导失稳模式的主导薄弱断面动态迁移之复杂场景, 需要制定相应暂态稳定控制策略。在薄弱断面关键支路识别方法, 以及关键受扰轨迹几何特征判稳方法的基础上, 针对大扰动冲击下主导薄弱断面迁移的复杂扰动场景, 提出了以交流支路实时受扰电气量为信息源的暂态稳定控制策略, 可有效降低系统失稳风险。大容量长距离交直流混联输电系统仿真结果, 验证了控制策略的有效性。

关键词: 振荡中心; 薄弱断面迁移; 暂态稳定控制; 关键支路; 受扰轨迹; 几何特征; 控制策略

Transient stability control adapting to dominant weak section migration

MIAO Tian¹, ZHENG Chao², MA Shiyong², LIU Guanqi¹, KE Xianbo³, NIU Shuanbao³, SONG Yunting²

(1. North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. Northwest Power Grid, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to adapt to complex scenario of the dynamic transfer of the dominant weak section which is characterized of leading instability mode of the dominant generator cluster under the large disturbance impact of power network, corresponding transient stability control strategy is needed. Based on the method such as identification of the key branch in the weak AC section and distinguishing the stability according to the geometrical feature of the key branch's disturbed trajectory, aiming to the complex disturbance scenarios that the weak AC section with oscillation center located will migrate after disturbed, a transient stability control strategy adapting to this scenario is proposed, which uses the real-time disturbed electric quantities of the key branch as the information source. Simulation results got from the HVDC and AC hybrid system verify the effectiveness of the control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207143).

Key words: oscillation center; weak AC section migration; transient stability and control; key branch; disturbed trajectory; geometrical features; control strategy

0 引言

保障电力系统安全运行, 是国民经济健康发展、社会安定团结的重要前提和基础^[1-2]。保持电力系统暂态稳定, 则是保障电力系统安全运行的重要内容。为此, 围绕电力系统暂态稳定分析与控制的研究, 一直是电力工业界和学术界关注的重点和热点^[3-7]。

近年来, 随着交直流电网输电距离增加、送电容量增大以及互联电网结构多样化发展, 大扰动冲

击下, 交直流混联电网暂态稳定特性日趋复杂。同时存在多个振荡中心落点的交流薄弱断面, 且表征机群主导失稳模式的主导薄弱断面已呈现出动态迁移现象。这些新的特征, 增加了电网暂态稳定分析与控制难度。在振荡中心迁移规律的暂态稳定分析方面, 文献[8]基于等值双机系统失步中心定位方法和振荡中心漂移规律, 实现了振荡中心实时定位; 文献[9]针对等值3机系统失步振荡中心频率特性, 进行了较为深入的研究, 提出了一种新的振荡中心定位方法; 文献[10]采用时域仿真并结合电网物理特性定性分析, 揭示了长距离输电型电网振荡中心分布特点、影响因素和一般特征; 文献[11]研究了

多频振荡下失步振荡中心的特性及其变化规律，并提出了定位方法。在基于振荡中心落点支路受扰特征的稳定控制方面，文献[12]揭示了大扰动冲击下，振荡中心落点交流支路有功轨迹“双峰一谷”特征机理及其与系统稳定性间的关联关系，并提出了基于局部受扰信息的暂态稳定控制判据；文献[13-14]研究了基于相位角的解列判据在复杂场景下的适用条件，提出了适用于大电网的配置原则和应对策略；文献[15]提出基于母线电压频率的解列判据，适应失步中心迁移，且不受电网结构与运行方式限制；文献[16]基于支路两端母线频率差的失步解列判据，提出基于广域测量信息的自适应失步解列策略。

目前，相关研究主要针对振荡中心落点的单一薄弱断面漂移场景，未能考虑多薄弱断面场景以及该场景下稳定控制措施实施后主导薄弱断面的迁移；此外，实施的稳定控制多为系统已失稳后的交流支路解列控制，未能判别受扰后系统稳定态势，并据此采取控制措施以避免系统失稳。为此，本文在文献[17-18]所提出的关键支路识别方法，以及关键支路受扰轨迹几何特征判稳方法的基础上，针对大扰动冲击下振荡中心落点主导薄弱断面迁移的复杂扰动场景下，提出了以交流支路实时受扰电气量为信息源的薄弱断面稳定控制策略，可有效降低系统失稳风险。中国南方电网大容量长距离交直流混联输电系统仿真结果，验证了控制策略的有效性。

1 关键支路识别及稳定判别方法简述

1.1 薄弱断面中关键支路识别

交流支路有功功率 P_l 传输特性，取决于支路两端母线电压幅值 U_s 、 U_r 的乘积 U_{sr} 以及相位差 δ_l 两者的波动特性，如式(1)所示。大扰动冲击下，交流有功出现极大值的条件分析表明， U_{sr} 持续跌落和 δ_l 持续增大的动态过程中， P_l 将出现第 1 个极大值，该极值时刻可表征系统稳定裕度已显著显小^[12]。

$$P_l = \frac{U_s U_r}{X_l} \sin(\delta_l) = \frac{U_{sr}}{X_l} \sin(\delta_l) \quad (1)$$

在薄弱断面中，各交流支路稳定性水平是不同的。其中，稳定裕度最小的交流支路，即稳定性最为脆弱的交流支路是该断面中的关键支路。关键支路有功轨迹第 1 个峰值最先出现于支路两端母线电压幅值持续跌落、电压相位差持续增大的动态过程中^[17]。对应的识别判据，如式(2)一式(4)所示，式中 t_c 对应交流支路有功出现第 1 个极值的时刻， n 为薄弱断面中交流支路数量， i 对应关键支路编号，下标“0”代表受扰前稳态运行量， ε_p 、 ε_U 、 ε_δ 分别为

判断是否为大扰动冲击的有功、电压和相位差死区，可取值为对应稳态量的 30%。

$$i = \min \{t_{1c}, t_{2c}, \dots, t_{nc}\} \quad (2)$$

$$\frac{dP_{il}}{dt} = 0, \frac{d\delta_{il}}{dt} > 0, \frac{dU_{isr}}{dt} < 0 \quad (3)$$

$$|P_{il} - P_{i0}| > \varepsilon_p, |U_{isr} - U_{isr0}| > \varepsilon_U, |\delta_{il} - \delta_{i0}| > \varepsilon_\delta \quad (4)$$

1.2 基于关键支路受扰轨迹凹凸性的稳定判别

关键支路是薄弱断面中稳定性最为脆弱的交流支路，进一步的研究表明，其两端母线相位差 δ_{lk} 和角频差 ω_{lk} 所构成相轨迹的几何特征，可表征系统稳定态势^[18]。

对应式(5)所示关键支路相轨迹，其几何特征及其与系统稳定性间的关联映射关系，分别如下。

$$\omega_{lk}(t) - F_\delta[\delta_{lk}(t)] = 0 \quad (5)$$

(1) 支路相轨迹位于上半平面，即 $\omega_{lk}(t) > 0$ ，若 $F_\delta''[\delta_{lk}(t)] < 0$ ，则相轨迹为凹轨迹；当相轨迹位于下半平面，即 $\omega_{lk}(t) < 0$ ，若 $F_\delta''[\delta_{lk}(t)] > 0$ ，则相轨迹为凹轨迹。因此，对应 $\omega_{lk}(t)F_\delta''[\delta_{lk}(t)] < 0$ 相轨迹为凹轨迹， t 时刻系统维持暂态稳定。

(2) 支路相轨迹位于上半平面，即 $\omega_{lk}(t) > 0$ ，若 $F_\delta''[\delta_{lk}(t)] > 0$ ，则相轨迹为凸轨迹；当相轨迹位于下半平面，即 $\omega_{lk}(t) < 0$ ，若 $F_\delta''[\delta_{lk}(t)] < 0$ ，则相轨迹为凸轨迹。因此，对应 $\omega_{lk}(t)F_\delta''[\delta_{lk}(t)] > 0$ ，相轨迹为凸轨迹， t 时刻系统失去暂态稳定。

(3) $F_\delta''[\delta_{lk}(t)] = 0$ ， t 时刻对应的支路相轨迹运行点为相轨迹凹凸性转换的拐点。

为计算当前 t 时刻关键支路相轨迹的凹凸性，可提取前 N_c 个 $(\delta_{lk}, \omega_{lk})$ 采样数据，以式(6)所示多项式拟合相轨迹曲线。对式(6)两端求二阶导数，可得式(7)。对应基于关键支路相轨迹凹凸性判别稳定性的条件，可以看出，若当前 t 时刻 $\omega_{lk}C_{lk} > 0$ ，则相轨迹呈凸特性，可判别系统失去暂态稳定性，否则系统稳定。

$$\omega_{lk}(t) = F_\delta[\delta_{lk}(t)] = C_{lk}\delta_{lk}^2(t) + B_{lk}\delta_{lk}(t) + A_{lk} \quad (6)$$

$$\frac{d^2\omega_{lk}(t)}{d\delta_{lk}^2(t)} = F_\delta''[\delta_{lk}(t)] = 2C_{lk} \quad (7)$$

2 基于关键支路的多薄弱断面稳定控制

为满足一次能源与负荷中心逆向分布特征下的资源优化配置要求，大容量远距离输电模式被广泛采用。该输电模式下，存在送端电网、功率穿越支撑电网和受端电网等不同功能定位的电网，相互间互联形成级联式结构。

大容量远距离级联式输电网，严重故障冲击下，振荡中心落点的交流支路通常会构成多个薄弱

断面^[19-20]。对应系统中发电机群主导失稳模式的网络“撕裂”断面为主导薄弱断面, 当系统失去暂态稳定时, 其中各支路两端母线相位差均单调增大, 其他断面则为非主导薄弱断面。为避免系统失稳而采取的稳定控制措施, 会使主导薄弱断面转换为非主导薄弱断面; 与此同时, 受功率转移、断面输电能力下降和不平衡能量重新分布等动态因素影响, 非主导薄弱亦会转换为主导薄弱断面, 即主导薄弱断面出现迁移。为保障电网暂态稳定, 需针对所有薄弱断面进行实时监测, 并判定失稳特征后实施稳定控制。

以薄弱断面中稳定性最为脆弱的关键支路识别方法, 以及关键支路受扰轨迹几何特征判稳方法为基础, 适应主导薄弱断面迁移的暂态稳定实时监测及控制策略流程如图 1 所示, 包括如下主要步骤。

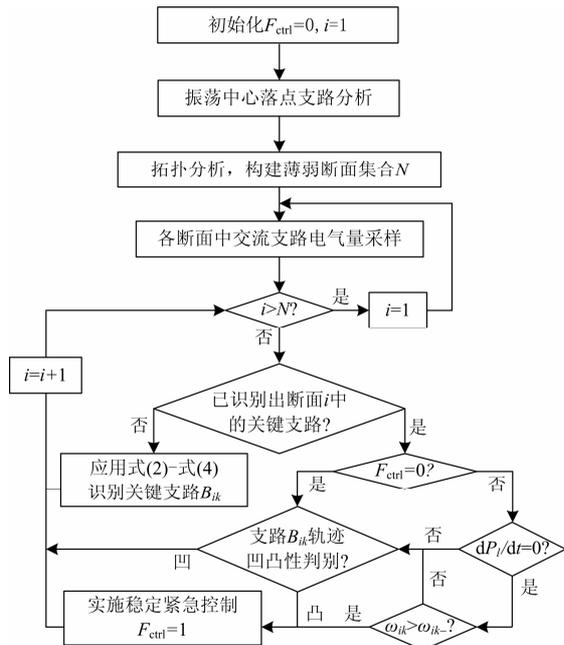


图 1 适应主导薄弱断面迁移的暂态稳定控制策略
Fig. 1 Transient stability control strategy adapting to dominating weak section migration

(1) 策略起始时将当前是否已实施过暂态稳定紧急控制的标志位 F_{ctrl} 设置为 0。

(2) 依据交流支路功率, 以及支路两端母线电压幅值和相位差等电气量, 确定振荡中心落点的交流支路集合, 并在此基础上进行拓扑分析, 构建待监控的 N 个薄弱断面集合。

(3) 实时采样各断面中交流支路受扰电气量, 针对断面 i , 应用式(2)一式(4)识别其中的关键支路 B_{ik} 。若已识别出支路 B_{ik} , 且 $F_{ctrl}=0$, 即尚未执行过稳定控制, 则判别支路 B_{ik} 相轨迹凹凸性。轨迹特征为凹则表征系统稳定, 无需控制; 为凸则表征系统将

失去稳定, 断面 i 为系统主导薄弱断面, 对应它来实施暂态稳定紧急控制, 同时设置 $F_{ctrl}=1$ 。

(4) 若已识别出支路 B_{ik} , 且 $F_{ctrl}=1$, 即当前已针对系统主导薄弱断面实施过稳定控制, 断面 i 为迁移后呈现出的新主导薄弱断面。此时, 若支路 B_{ik} 有功尚未达到极大值, 则可进一步判别其轨迹凹凸性; 达到极大值, 且其两端母线角频差 ω_{ik} 大于第一次有功极大值对应的值 ω_{ik-} , 则表征系统稳定性较之前进一步减小。鉴于扰动已持续较长时间, 因此为提高控制快速性、提升控制效果, 此时无需再判别相轨迹凹凸性, 可直接实施暂态稳定紧急控制。

(5) 针对本时刻, 按照控制策略流程, 依次遍历所有薄弱断面, 直至 $i > N$, 进而可实现对主导薄弱断面迁移场景下的系统稳定监测和控制。

3 振荡中心迁移场景及稳定控制效果验证

3.1 多薄弱断面交直流输电系统

中国南方电网是典型的交直流并联多断面级联型输电系统, 主要由云南(云)、贵州(贵)、广西(桂)以及广东(粤)四个省级电网互联构成, 如图 2 所示。云南省境内水能资源丰富, 为满足水电送出以及珠三角负荷中心地区用电需求, 2010 年投运了连接云南楚雄换流站和广东广州换流站的云广 ± 800 kV/5 000 MW 特高压直流。云广特高压直流非孤岛运行, 即与交流主网互联方式下, 若发生直流双极闭锁故障, 则送端云南电网大量盈余功率转移至交流电网, 将会形成多个暂态稳定薄弱断面, 若切机措施不当, 则系统存在失稳的风险。

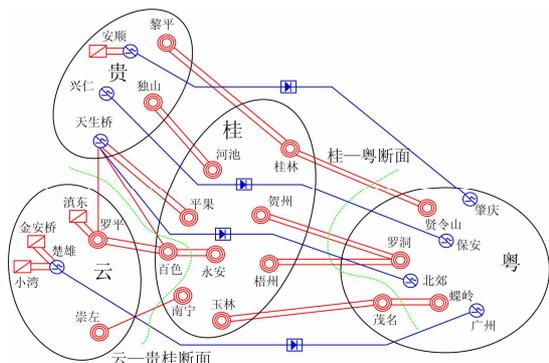


图 2 南方电网交直流级联型输电系统
Fig. 2 Cascaded transmission system of China Southern Power Grid with HVDC and AC branches

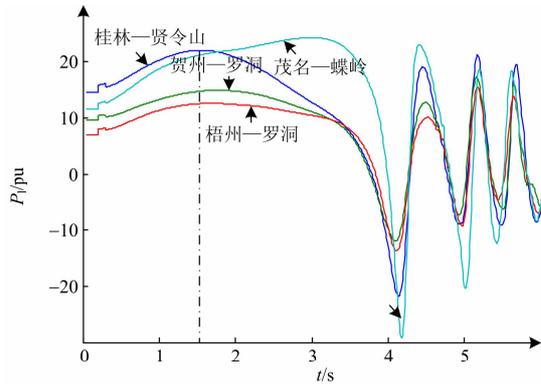
应用 PSD-BPA 电力系统仿真软件, 对云广直流额定送电条件下双极闭锁故障进行暂态稳定分析。计算结果表明, 受扰后系统存在两个薄弱断面, 分别为桂—粤断面和云—贵桂断面, 如图 2 所示。

其中桂—粤断面由桂林—贤令山、贺州—罗洞、梧州—罗洞以及茂名—蝶岭等交流支路组成；云—贵桂断面由罗平—天生桥、百色—天生桥、百色—永安以及崇左—南宁等交流支路组成。以下将考察断面中各支路受扰轨迹差异以及基于关键支路的多薄弱断面稳定控制策略的有效性。

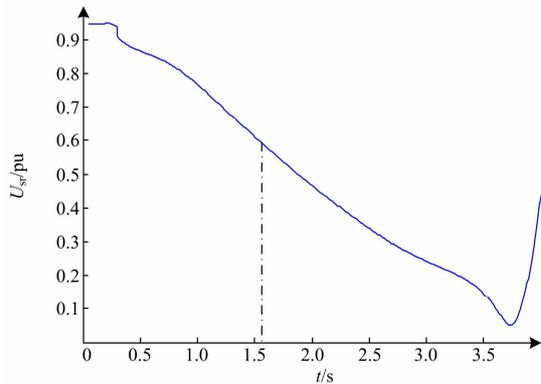
3.2 薄弱断面的受扰暂态稳定性分析

3.2.1 桂—粤薄弱断面关键支路及其轨迹特征

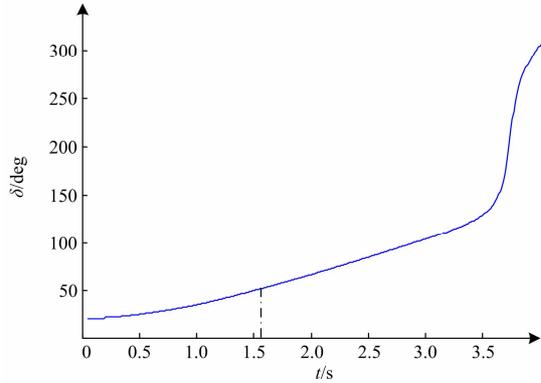
桂—粤薄弱断面中各支路有功功率受扰轨迹如图 3 所示。可以看出，桂林—贤令山支路有功功率



(a) 桂林—贤令山支路有功功率



(b) 桂林—贤令山支路电压



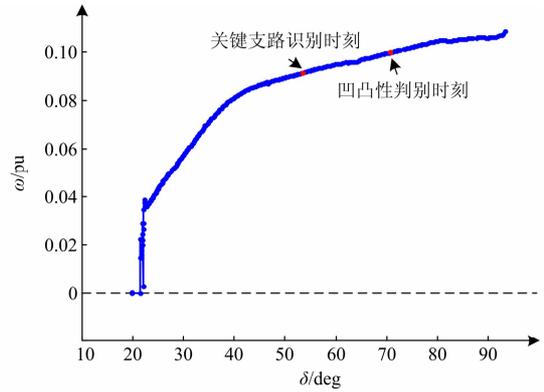
(c) 桂林—贤令山支路相位差

图 3 桂—粤断面交流支路受扰轨迹

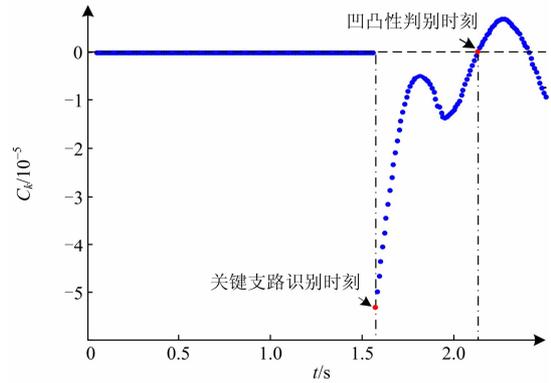
Fig. 3 Disturbed trajectories of branches in Gui-Yue AC transmission section

在 1.55 s 时最先达到极大值，且该极值出现时刻各电气量满足式(3)，即支路两端电压幅值乘积和相位差仍呈续下降和增大的趋势。因此，桂林—贤令山支路是桂—粤薄弱断面中的关键支路。

1.55 s 识别出桂林—贤令山支路为关键支路后，即可对如图 4(a)所示的相轨迹进行凹凸性判别，结果如图 4(b)所示。可以看出，在 2.12 s 时 $\omega_{ik}C_{ik}$ 由负变为正，可判别其相轨迹由凹转为凸，即可判别该断面后续轨迹将失去暂态稳定性。



(a) 关键支路相轨迹



(b) 相轨迹凹凸性

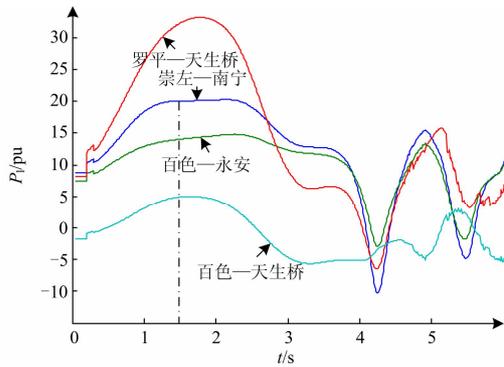
图 4 桂林—贤令山关键支路相轨迹及其凹凸性

Fig. 4 δ - ω trajectory and its convexity of Guilin-Xianlingshan

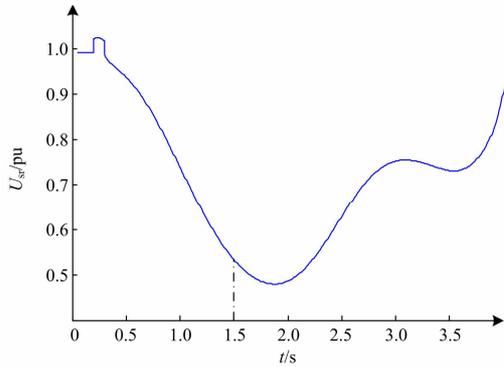
3.2.2 云—贵桂薄弱断面关键支路及其轨迹特征

云—贵桂薄弱断面中各支路有功功率受扰轨迹如图 5 所示。可以看出，崇左—南宁支路有功功率在 1.54 s 时最先达到极大值，且该极值出现时刻各电气量满足式(3)，即支路两端电压幅值乘积和相位差仍呈下降和增大的趋势。因此，崇左—南宁支路是云—贵桂薄弱断面中的关键支路。

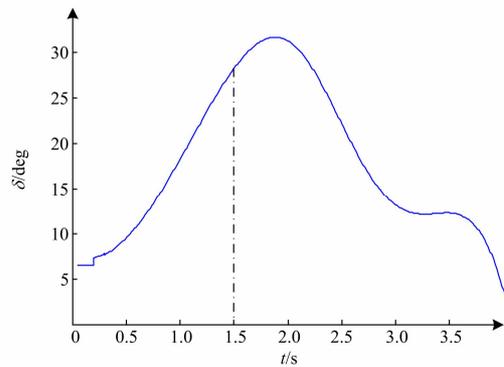
1.54 s 识别崇左—南宁支路为关键支路后，即可实施对如图 6(a)所示的相轨迹进行凹凸性判别，结果如图 6(b)所示。可以看出，在首摆结束期间， $\omega_{ik}C_{ik}$ 均小于零，即相轨迹均为凹轨迹，该断面维持稳定。



(a) 各支路有功功率



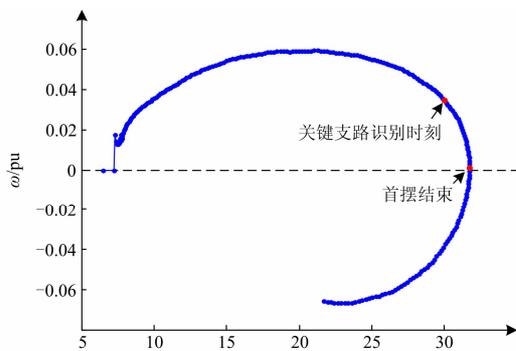
(b) 崇左-南宁支路电压



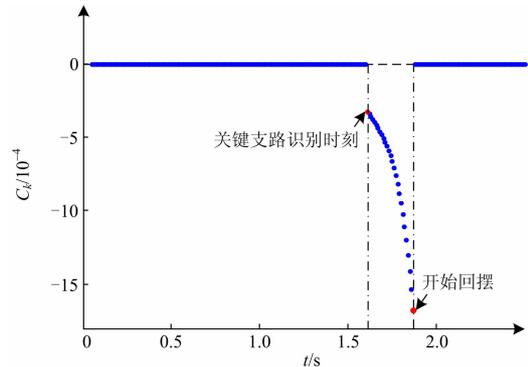
(c) 崇左-南宁支路相位差

图 5 云—贵桂断面交流支路受扰轨迹

Fig. 5 Disturbed trajectories of branches in Yun-Gui AC transmission section



(a) 关键支路相轨迹



(b) 相轨迹凹凸性

图 6 崇左—南宁关键支路相轨迹及其凹凸性

Fig. 6 δ - ω trajectory and its convexity of Chongzuo-Nanning

3.2.3 多薄弱断面稳定性评述

从以上分析可以看出, 大扰动冲击下, 南方电网多断面输电系统稳定性, 具有如下特征。

(1) 系统失去暂态稳定时, 必然存在一个振荡中心落点的交流断面, 其中各支路两端母线相位差持续增大, 断面两侧机组失去同步。该断面为系统的主导薄弱断面。

(2) 除主导薄弱断面外, 还存在振荡中心落点的非主导薄弱断面, 即其中支路两端母线相位差虽未单调持续增长, 但其变化幅值较大。

(3) 主导薄弱断面与非主导薄弱断面中, 均可识别出关键支路, 由其受扰相轨迹的凹凸性特征, 可判别相应断面的稳定性。

(4) 恢复主导薄弱断面稳定性的控制, 可能使原非主导薄弱断面成为趋于失稳的新的主导薄弱断面。为此, 需持续监测和判别薄弱断面中关键支路受扰轨迹的特征。

3.3 多薄弱断面稳定控制效果

3.3.1 桂—粤断面稳控效果及对云—贵桂断面的影响

如图 4(b)所示, 桂—粤断面中关键支路桂林—贤令山支路的相轨迹在 2.12 s 由凹转为凸, 依据图 1 所示多薄弱断面稳定控制策略流程, 并考虑通信及稳控动作的 0.2 s 延时, 在 2.32 s 实施稳定控制, 切除贵州电网构皮滩电厂 1 台 600 MW 机组。

对应无控制、切除机组控制以及交流支路解列控制 3 种情况, 桂林—贤令山支路有功轨迹对比曲线如图 7 所示。可以看出, 针对桂—粤断面失稳态势实施暂态稳定紧急控制, 能有效避免解列装置动作, 恢复该断面稳定。

持续仿真表明, 桂—粤断面虽然能够恢复稳定, 但云—贵桂断面将转而失去稳定。崇左—南宁支路功率在跌落至极小值后提升增大, 并在 3.92 s 再次满足式(3)。若无进一步的稳定控制, 则 4.47 s 开始,

该断面中各支路将相继开断, 云南电网与主网解列, 如图 8 所示。因此, 需要针对控制措施实施后的主导薄弱断面迁移, 进一步实施稳定控制。

3.3.2 云—贵桂断面稳控效果

与图 8 对应的崇左—南宁支路的相轨迹如图 9 所示。满足式(3), 有功轨迹出现第 2 次极大值时刻, 即 3.92 s 时, 该支路角频差 ω_{ik} 大于第 1 次有功极大值对应的值 ω_{ik-} , 表征云—贵桂断面稳定性进一步恶化。依据如图 1 所示控制策略, 无需进一步判别相轨迹凹凸性, 应快速执行稳定控制, 以提升稳定控制效果。

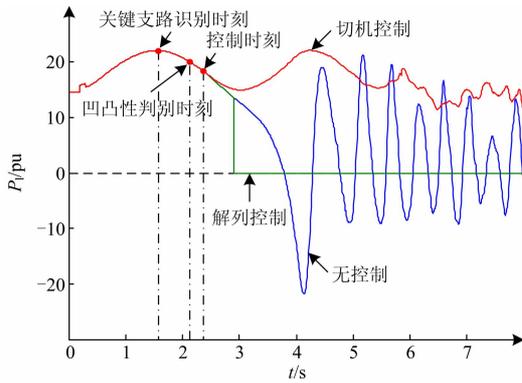
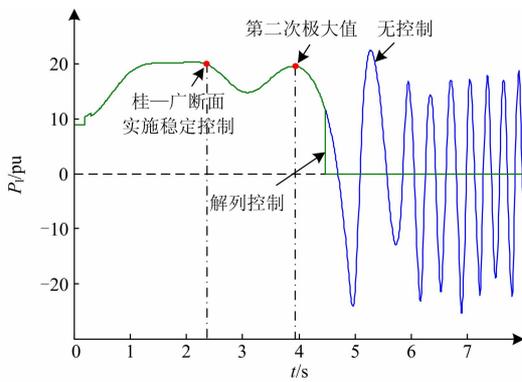
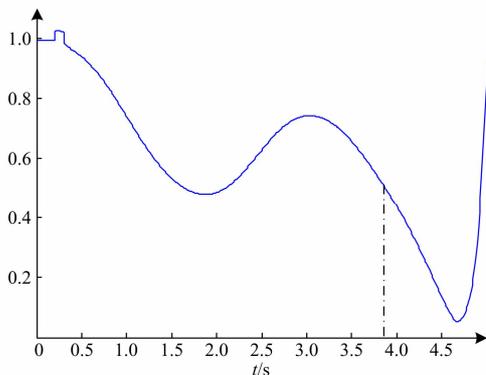


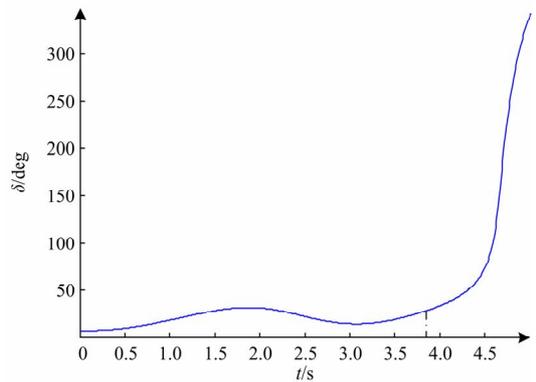
图 7 不同控制措施下桂林—贤令山有功轨迹
Fig. 7 Power trajectory of Guilin-Xianlingshan



(a) 崇左—南宁支路有功功率



(b) 崇左—南宁支路电压



(c) 崇左—南宁支路相位差

图 8 云—贵桂断面中崇左—南宁关键支路受扰轨迹
Fig. 8 Disturbed trajectory of the key branch in Yun-GuiGui AC section

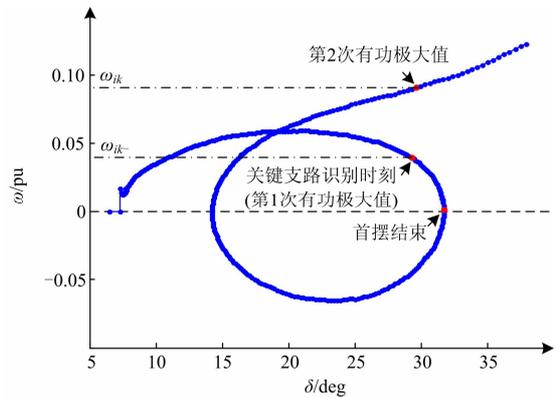
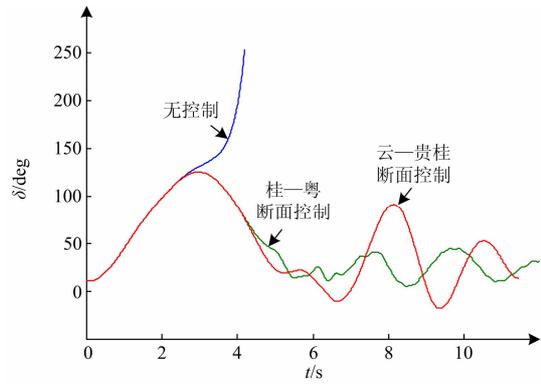


图 9 崇左—南宁支路轨迹相轨迹

Fig. 9 δ - ω disturbed trajectory of Chongzuo-Nanning

考虑通信及控制 0.2 s 延时, 4.12 s 切除云南电网金安桥电站和小湾电站共计 5 台机组, 则可恢复云—贵桂断面稳定运行, 避免云南电网与主网解列。图 10 所示为桂—粤和云—贵桂断面相继实施稳定控制后, 贵州、云南机组与广东机组间的功角差曲线。



(a) 贵州安顺机组

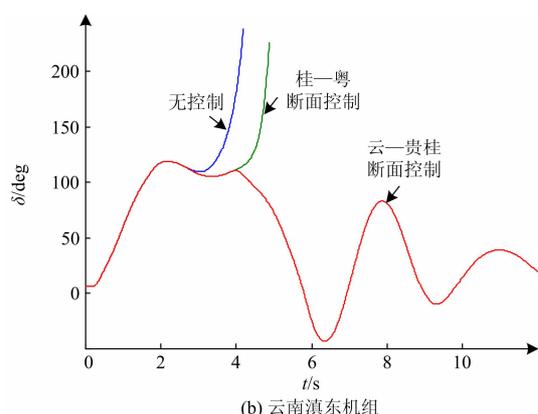


图 10 实施控制后的云—贵桂断面关键支路轨迹

Fig. 10 δ - ω disturbed trajectory of generator

综上所述可以看出, 在多断面输电系统中, 基于各断面关键支路受扰轨迹的稳定控制策略, 可有效应对主导薄弱断面迁移, 提高电网安全防御能力。

4 结论

(1) 严重扰动冲击下, 薄弱断面存在关键支路, 其有功功率极大值时刻所对应的支路两端电压幅值、电压相位差受扰轨迹特征, 可用以表征断面稳定水平。

(2) 交流多断面输电系统中, 实施稳定控制后, 趋于失稳的主导薄弱断面会出现迁移。因此, 为保证系统受扰后稳定运行, 需对各薄弱断面中的关键支路受扰轨迹持续监测, 并进行稳定判别。

(3) 基于关键支路轨迹特征的多断面输电系统稳定控制, 可有效应对主导薄弱断面迁移, 提高电网安全防御能力。

参考文献

- [1] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-11, 16.
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected north America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11, 16.
- [2] 李艳卿, 李华强, 李迁, 等. 基于支路综合脆弱性的电网抗毁性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 80-85.
LI Yanqing, LI Huaqiang, LI Qian, et al. Power system invulnerability assessment based on branch comprehensive vulnerability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 41(7): 80-85.

- [3] 王科, 游大海, 尹项根, 等. 基于支路势能脊的电力系统暂态稳定分析和临界割集识别[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 262-269.
WANG Ke, YOU Dahai, YIN Xianggen, et al. Power system transient stability analysis and critical cutset detection based on branch ridge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 262-269.
- [4] 吴为, 汤涌, 孙华东, 等. 基于广域量测信息的电力系统暂态稳定研究综述[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 81-87.
WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong, et al. A survey on research of power system transient stability based on wide-area measurement information[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 81-87.
- [5] 邵雅宁, 唐飞, 刘涤尘, 等. 一种适用于 WAMS 量测数据的系统暂态功角稳定评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 33-39.
SHAO Yaning, TANG Fei, LIU Dichen, et al. An approach of transient angle stability assessment in power system for WAMS measured data[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 33-39.
- [6] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.
LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.
- [7] 赵晋泉, 钱莉, 陈刚. 一种基于 EEAC 和轨迹灵敏度的暂态稳定约束最优潮流模型与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 9-14.
ZHAO Jinquan, QIAN Li, CHEN Gang. A novel EEAC and sensitivity based model and algorithm of transient stability constrained optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 9-14.
- [8] 张艳霞, 蒙高鹏, 赵冉, 等. 复杂场景下失步中心定位及振荡中心漂移规律[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2264-2269.
ZHANG Yanxia, MENG Gaopeng, ZHAO Ran, et al. Locating of out-of-step centre and mechanism of oscillation centre migrating under complicated scenes[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2264-2269.
- [9] 郭珂, 唐飞, 廖清芬, 等. 多频失步振荡场景下大区互联电网失步振荡中心电压频率变化规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3257-3263.
GUO Ke, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Study on out-of-step center in multi-frequency oscillation of interconnected power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3257-3263.

- [10] 丁剑, 马世英, 吴丽华, 等. 长距离输电型电网振荡中心分布及解列措施[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 186-191.
DING Jian, MA Shiyong, WU Lihua, et al. Out-of-step oscillation centers distribution and islanding operating of long distance transmission interconnected power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 186-191.
- [11] 刘福锁, 方勇杰, 李威, 等. 多频振荡下振荡中心变化规律及其定位[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 68-73.
LIU Fusuo, FANG Yongjie, LI Wei, et al. Out of step oscillation center and its location under multi-frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 68-73.
- [12] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 振荡中心联络线大扰动轨迹特征及紧急控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1079-1087.
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. Large disturbed trajectory characteristic of tie-line located in the oscillation center and emergency control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1079-1087.
- [13] 刘福锁, 方永杰, 吴雪莲, 等. 基于相位角的失步解列判据在复杂场景下的适应性及对策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 71-75.
LIU Fusuo, FANG Yongjie, WU Xuelian, et al. Adaptability and countermeasures of splitting criterion based on phase angle in complex scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 71-75.
- [14] 董希建, 赵杰, 凌超, 等. 基于相位角原理的失步振荡解列判据机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 10-15.
DONG Xijian, ZHAO Jie, LING Chao, et al. Research on out-of-step oscillation criterion mechanism based on principle of phase angle[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 10-15.
- [15] 唐飞, 杨健, 廖清芬, 等. 基于母线电压频率的失步振荡解列判据研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2998-3007.
TANG Fei, YANG Jian, LIAO Qingfen, et al. Study on out-of-step oscillation criterion based on bus voltage frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2998-3007.
- [16] 陈恩泽, 唐飞, 刘涤尘, 等. 振荡中心迁移下的电网失步解列策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3799-3805.
CHEN Enze, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Splitting strategy of power systems based on migration of oscillation center[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3799-3805.
- [17] 郑超, 苗田. 交流薄弱断面中关键支路动态识别及稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5429-5436.
ZHENG Chao, MIAO Tian. Study on the dynamic identification method of key branch of ac weak section and stability control[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(21): 5429-5436.
- [18] 郑超, 苗田, 马世英. 基于关键支路受扰轨迹凹凸性的暂态稳定判别及紧急控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2600-2610.
ZHENG Chao, MIAO Tian, MA Shiyong. Transient stability identification and emergency control based on the convex characteristic of the key branch's disturbed trajectory[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2600-2610.
- [19] 余贻鑫, 樊纪超, 冯飞. 暂态功角稳定不稳定平衡点类型和临界割集数量的对应关系[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 1-6.
YU Yixin, FAN Jichao, FENG Fei. Relationship between the number of critical cut-sets and the type of unstable equilibrium point with respect to transient angle stability[J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(8): 1-6.
- [20] 穆钢, 蔡国伟, 胡哲, 等. 机网结合的暂态稳定评价方法—关键割集组法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(7): 97-101.
MU Gang, CAI Guowei, HU Zhe, et al. Network-machine combined transient stability assessment method—key cutsets method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1997, 37(7): 97-101.

收稿日期: 2015-10-07; 修回日期: 2015-12-04

作者简介:

苗田(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: strongmt@126.com

郑超(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定与控制、交直流系统分析、FACTS、新能源并网技术等方面的研究工作;

马世英(1969-), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统规划及运行控制技术研究工作。

(编辑 周金梅)