

DOI: 10.7667/PSPC160908

## 解列后局部电网功角首摆失稳问题研究

李碧君<sup>1,2</sup>, 刘福锁<sup>1,3</sup>, 吴雪莲<sup>1,2</sup>, 李威<sup>1,2</sup>

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211006; 3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 基于 EEAC 理论, 研究解列后局部电网功角首摆失稳问题。构建三区域互联电网, 形成局部电网解列后等值模型。针对无故障解列和故障后解列两种情况, 分析解列前后局部电网的等值单机无穷大母线(OMIB)系统的功角-功率特性曲线变化特点。结合解列后局部电网首摆功角稳定裕度计算, 从对 OMIB 系统解列时刻的相对动能、解列扰动后的首摆加速面积以及最大减速面积的影响方面。分析影响首摆稳定性的因素。最后, 基于电力系统安全稳定量化分析与优化决策软件 FASTEST, 在等值电网和实际大电网进行仿真验证。研究结论有助于采取有针对性的防控措施以提高解列后局部电网安全稳定水平。

**关键词:** 解列; 功角稳定; 首摆失稳; 扩展等面积准则(EEAC)

### A study on the first swing of angle instability in the local power network after splitting

LI Bijun<sup>1,2</sup>, LIU Fusuo<sup>1,3</sup>, WU Xuelian<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>

(1. Nari Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211006, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Based on the theory of extended equal area criterion (EEAC), the first swing of angle instability in the local power network after splitting is studied in this paper. A 3-region interconnected power system is constructed, and then, the equivalent model of the local power network after splitting is built. With the respect to the non-fault and fault-driven splitting, the change characteristics, that exist in the power-angle curve of one machine-infinity bus(OMIB) system of the local power network before and after splitting, is analyzed. Based on the computation of stability margin, the main influence factors of the first swing of angle instability are studied, according to Relative Kinetic Energy of OMIB when splitting, the acceleration area and the maximum deceleration area of the first swing. FASTEST based simulation results of the equivalent small power grid and the actual large power grid are given to show the conclusion.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Multi-stability Morphology Interactive influence Analysis and Control Technique Research under Large Grid Serious Fault".

**Key words:** splitting; angle stability; first swing of angle instability; extended equal area criterion (EEAC)

## 0 引言

针对大电网运行和仿真分析中发现的新现象, 许多学者在探究其机理。文献[1]基于对区域电网内弱联机群摆动对互联系统功角稳定性影响的分析研究, 解释了较小短路电流的故障可能造成互联系统失去暂态稳定, 进而引起联络线解列的现象。文献

[2]分析了区域电网远端故障引发互联系统稳定破坏现象和影响互联电网稳定特性的关键因素。文献[3]分析了多送出直流系统送端故障引发稳定破坏的机理。文献[4]分析了互联电网联络线功率波动机理, 文献[5]揭示了解列后孤岛电网电压失稳机理。

扩展等面积准则(EEAC)理论在研究暂态稳定新特征、诠释出现貌似不可理喻新现象的机理方面一直发挥着重要作用。文献[6]分析了暂态稳定裕度随故障切除时间非单调变化的机理。文献[7]研究了南方电网中安天线接入后某些原来稳定的故障反而

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“大电网严重故障下多稳定形态交互影响分析及控制技术研究”

变为不稳定的机理。文献[8]基于 EEAC 理论揭示了快关汽门、切机、切负荷、快速响应励磁的暂态稳定控制负效应机理。文献[9]以 EEAC 理论为指导, 讨论远离故障点的机群失稳的原理, 进一步发现了故障点附近的负荷量会改变失稳机群或/和失稳摆次的现象, 并揭示其机理。文献[10]基于 EEAC 理论, 分析了局部地区短路故障导致跨大区互联电网首摆和第 2 摆两种失稳模式之间变化的现象, 阐明了随着系统参数、控制策略变化的系统失稳模式演化机理。

为确保解列后两侧系统都能够保持安全稳定运行, 文献[11]结合解列控制领域的研究动向和工程实践, 提出了一种自适应解列控制系统的体系架构; 文献[12]通过典型算例仿真, 研究解列后孤岛频率电压相互作用机理。为确保电网紧急状态解列后进行快速主动有序的控制, 文献[13]提出了基于解列信息触发的孤立电网紧急控制方法。解列后的两侧系统各自能保持同步运行是基本条件之一, 探明解列后局部电网功角失稳机理, 对于预防解列后局部电网再失步尤为重要。

本文基于 EEAC 理论, 构建三区域互联电网, 形成局部电网解列后等值模型, 研究解列后局部电网功角首摆稳定性分析方法, 分析影响首摆稳定性的因素, 并用实际大电网进行仿真验证, 对采取有针对性的防控措施提高解列后局部电网安全稳定水平有所裨益。

## 1 局部电网等值模型

为了分析局部电网在解列前后的安全稳定特性, 研究解列后局部电网功角首摆失稳机理, 构建如图 1 所示三区域互联系统。系统正常运行时, 三个区域电网 S、A 和 R(以下分别简称 S、A 和 R)联网运行; 系统解列运行时, S 和 A 保持互联构成一个局部电网(以下简称局部电网)运行, 区域电网 R 独立运行。本文要研究的是: 解列后, 局部电网(互联电网 S 和 A)的功角稳定性问题。区域电网 S 简称 S, 区域电网 A 简称 A, 区域电网 R 简称 R。

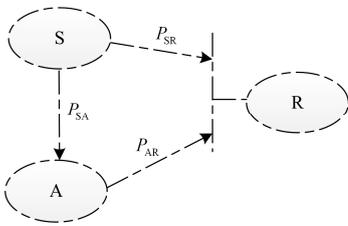


图 1 三区域互联电网

Fig. 1 Three regional interconnected power grid

### 1.1 基于静态 EEAC 等值模型

基于 EEAC 理论<sup>[14]</sup>, 定义 S 和 A 的等值参数: 等值惯量  $M_S$  和  $M_A$ , 等值机械输入功率  $P_{mS}$  和  $P_{mA}$ , 等值电气输出功率  $P_{eS}$  和  $P_{eA}$ 。

S 和 A 等值系统相对运动的稳定性问题, 在系统运行的每一时刻都可用式(1)描述, 为了简化都不带时标, 符号含义及其计算方法与文献[14]相同, 不再另行说明。

$$\begin{cases} M_S \ddot{\delta}_S = P_{mS} - P_{eS} \\ M_A \ddot{\delta}_A = P_{mA} - P_{eA} \\ \delta_{SA} = \delta_S - \delta_A \\ P_m = (M_A P_{mS} - M_S P_{mA}) / M_T \\ P_e = (M_A P_{eS} - M_S P_{eA}) / M_T \\ M = M_S M_A / M_T \\ M_T = M_S M_A \end{cases} \quad (1)$$

基于静态 EEAC, S 和 A 的等值电气输出功率可描述如式(2)。

$$\begin{cases} P_{eS} = H_S + C_S \cos \delta_{SA} + D_S \sin \delta_{SA} \\ P_{eA} = H_A + C_A \cos \delta_{SA} + D_A \sin \delta_{SA} \end{cases} \quad (2)$$

式中: 等号右侧第二项和第三项表示电气输出功率中与  $\delta_{SA}$  相关的量; 第一项  $H_S$  和  $H_A$  表示电气输出功率中与  $\delta_{SA}$  无关的量, 其计算方法与系统运行状态相关, 解列前后有所区别, 在 1.2 节详细说明。

解列后局部电网的等值 OMIB 系统模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} M \ddot{\delta}_{SA} = P_m - P_e \\ P_e = P_C + P_{\max} \sin(\delta_{SA} - \gamma) \\ P_C = (M_A H_S - M_S H_A) / M_T \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2 解列前后的差异

在系统正常运行阶段和解列运行阶段, 1.1 节所述模型具有普适性, 仅需根据各个阶段的特点, 将相应参数代入, 分析局部电网的安全稳定特性。

电网解列不改变 S 和 A 之间的电气联系, 以及内部电气功率, 等值惯量  $M_S$  和  $M_A$ , 等值机械输入功率  $P_{mS}$  和  $P_{mA}$ 。解列使局部电网与 R 的交换功率变为 0。

因此, 解列前后的差异主要在于 S 和 A 的电气输出功率变化, 继而引起模型中参数  $H_S$ ,  $H_A$ ,  $P_{eS}$ ,  $P_{eA}$ ,  $P_C$  和  $P_e$  改变。为了显示解列前后的区别, 在下标中加 N 表示系统正常运行阶段, 在下标中加 T 表示解列后运行阶段。三区域互联系统正常运行阶段, S 和 A 的电气输出功率如式(4)。

$$\begin{cases} P_{eSN} = P_{SS} + P_{SA} + P_{SR} \\ P_{eAN} = P_{AA} + P_{AS} + P_{AR} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{SS}$  和  $P_{AA}$  分别是 S 和 A 的内部电气功率;  $P_{SA}$  和  $P_{AS}$  是 S 和 A 之间的交换功率;  $P_{SR}$  和  $P_{AR}$  分别是 S 和 A 向 R 输送的功率。因而

$$\begin{cases} H_{SN} = P_{SS} + P_{SR} \\ H_{AN} = P_{AA} + P_{AR} \end{cases} \quad (5)$$

系统解列后运行阶段, S 和 A 的电气输出功率为

$$\begin{cases} P_{eST} = P_{SS} + P_{SA} \\ P_{eAT} = P_{AA} + P_{AS} \end{cases} \quad (6)$$

因而  $H_{ST} = P_{SS}$ ,  $H_{AT} = P_{AA}$ 。

## 2 解列后局部电网功角稳定分析

根据解列前的电网运行状态, 对无故障解列和故障后解列两种情况, 分析解列后局部电网功角稳定性。

### 2.1 无故障解列

无故障解列的特点是: 解列触发前 S 和 A 等值系统没有相对运动, 其初始相对动能为 0。解列对局部电网的冲击是 S 和 A 输出的电气功率瞬时变化  $P_{SR}$  和  $P_{AR}$ , 可能导致 S 和 A 出现不同程度的机械功率和电气功率的不平衡量, 继而 S 和 A 的等值机功角加速度有差异, 等值机功角发生相对运动。

无故障解列后, 局部电网的等值 OMIB 系统的功角-功率特性曲线如图 2 所示。

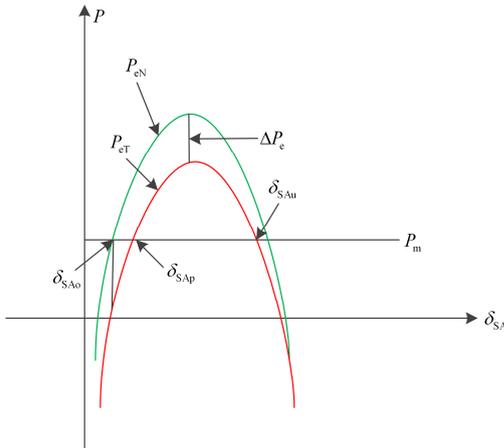


图 2 无故障解列局部电网等值 OMIB 系统功角-功率曲线

Fig. 2 Curve of  $\delta_{SA} - P$  of OMIB

解列前稳态运行点  $\delta_{SA0}$ , 对应于  $P_m = P_{eN}$ ,  $\delta_{SA0} = \arcsin[(P_m - P_{CN}) / P_{\max}] + \gamma$ 。解列使电气功率发生突变, 变化量:

$$\Delta P_e = P_{eN} - P_{eT} = (M_A P_{SA} - M_S P_{RA}) / M_T = (M_A P_{SR} - M_S P_{AR}) / M_T$$

不失一般性,  $\Delta P_e > 0$  (如果定义的 S 和 A 使  $\Delta P_e < 0$ , 可通过置换 S 和 A, 使  $\Delta P_e > 0$ ), 电气功率曲线向下平移, 机械功率大于电气功率, 注入加速动能, 正向加速面积如式(7), 最小减速面积如式(8)。稳定裕度如式(9)所示。

$$A_{incl} = \int_{\delta_{SA0}}^{\delta_{SAp}} (P_m - P_{eT}) d\delta_{SA} \quad (7)$$

$$A_{decl} = \int_{\delta_{SAp}}^{\delta_{SAu}} (P_{eT} - P_m) d\delta_{SA} \quad (8)$$

$$\eta_1 = A_{decl} - A_{incl} \quad (9)$$

如果稳定裕度大于 0, 则解列后局部电网首摆稳定, 否则首摆失稳。

### 2.2 故障后解列

故障后解列的特点是: 解列时局部电网已经受到故障及其控制措施(如有的话)扰动, 解列触发前 S 和 A 的功角可能已有相对运动, 解列时运行点  $\delta_{SAT}$  已经偏离稳态运行点  $\delta_{SA0}$ , 相对动能可能不为 0; 解列是局部电网受到的再次扰动。与稳态运行时解列相同, 故障后解列使局部电网与 R 的交换功率瞬时降低至 0, 发生突变。解列后局部电网的稳定性情况, 是解列前受到的扰动影响和受到解列扰动影响的叠加。

以解列时刻 S 和 A 等值机功角相对运动方向为正。如果解列后局部电网等值 OMIB 的机械功率大于电气输出功率, 即  $P_m \geq P_{eT0+}$ , 则注入加速能量, 继续正向加速; 如果解列后局部电网等值 OMIB 的机械功率小于电气输出功率, 即  $P_m < P_{eT0+}$ , 则注入减速能量, 正向减速。以解列后机械功率大于电磁功率情况详细分析。对于故障后解列, 局部电网 S 和 A 等值机功角相对运动从时间尺度分为两个阶段: 从初始故障扰动发生到解列触发前是第一个阶段, 从在稳态运行点发生初始故障扰动开始, 可能还有后续故障和安全稳定控制措施的扰动, 直至解列时结束; 解列后是第二阶段, 从跳开局部电网与 R 的联络线开始。在这两个阶段, 局部电网的等值 OMIB 的功角-功率特性曲线变化情况如图 3 所示。

在第一个阶段, 初始故障扰动发生, 从稳态运行点  $(\delta_{SA0}, P_m)$  开始至解列前的运行点  $(\delta_{SAT0-}, P_{eT0-})$  结束; 在第二个阶段, 解列触发, S 和 A 与 R 的交换功率瞬时降低至 0, 运行点从解列前  $(\delta_{SAT0-}, P_{eT0-})$  突变到  $(\delta_{SAT0+}, P_{eT0+})$ , 后者是该阶段的起点。基于对第一阶段全系统(包括 S、A 和 R)动态过程的仿真, 得到 S 和 R(A) 的等值机的电气输出功率和等值功角受扰轨迹, 继而得到局部电网等值 OMIB 的功角-功率曲线, 进一步得到解列触发前的运行点  $(\delta_{SAT0-}, P_{eT0-})$ , 以及该时刻 S 和 A 等值机功角相对

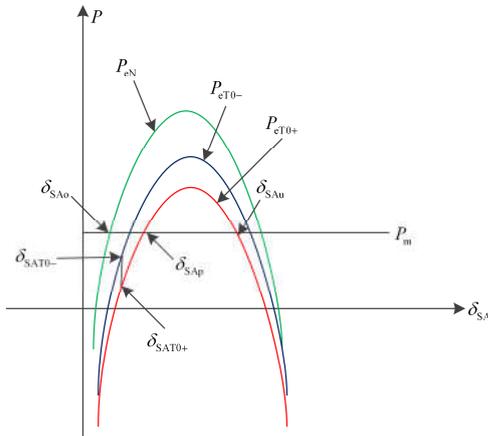


图3 故障解列后局部电网等值 OMIB 系统功角-功率曲线  
(机械功率大于等于电气功率)

Fig. 3 Curve of  $\delta_{SA} - P$  of OMIB ( $P_m \geq P_{eT0+}$ )

运动动能  $E_{KT0}$ 。解列不改变局部电网中的机组构成, 因而不会引起  $\delta_{SA}$  和相对运动动能突变, 所以  $\delta_{SAT0+} = \delta_{SAT0-}$ ,  $E_{KT0+} = E_{KT0-}$ ; 结合前述解列后局部电网等值 OMIB 的功角—电气功率函数, 得到  $\delta_{SAT0+}$  对应的电气功率  $P_{eT0+}$ , 从而得到第二阶段的起始位置 ( $\delta_{SAT0+}, P_{eT0+}$ )。

则解列后系统稳定裕度如式(10)所示。

$$\eta_2 = \int_{\delta_{SAp}}^{\delta_{SAu}} (P_{eT} - P_m) d\delta_{SA} - \int_{\delta_{SAT0+}}^{\delta_{SAp}} (P_m - P_{eT}) d\delta_{SA} - E_{KT0+} \quad (10)$$

同理可求得当  $P_m < P_{eT0+}$  场景下, 局部电网的等值 OMIB 的功角—功率特性曲线变化情况如图 4 所示。解列后系统稳定裕度如式(11)所示, 详细推导过程不再赘述。

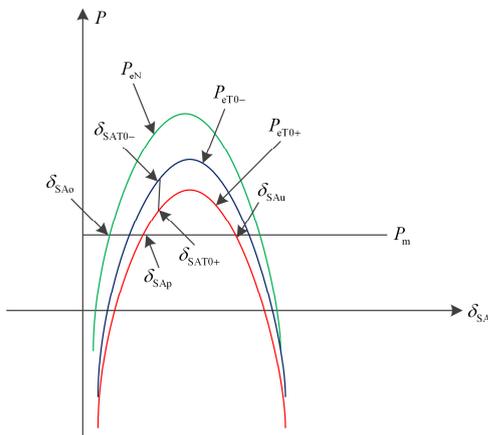


图4 故障解列后分区电网等值单机系统功角-功率曲线(机械功率小于电气功率)

Fig. 4 Curve of  $\delta_{SA} - P$  of OMIB ( $P_m < P_{eT0+}$ )

$$\eta_3 = \int_{\delta_{SAT0+}}^{\delta_{SAu}} (P_{eT} - P_m) d\delta_{SA} - E_{KT0+} \quad (11)$$

### 3 影响解列后局部电网稳定性的因素

从上述分析可见, 解列后局部电网的首摆功角稳定性与解列时刻的等值 OMIB 系统相对动能和解列扰动后的首摆加速面积、最大减速面积密切相关。

在局部电网与外部交换功率和互联电气距离一定的情况下, 解列时机和解列前扰动情况对等值 OMIB 系统相对动能影响比较大, 解列时刻不同, 相对动能不同; 解列前扰动程度越大, 互联电网受到的冲击越大, 至解列时刻局部电网等值 OMIB 系统累积的相对动能也越大, 对解列后局部电网的首摆稳定性也就越不利。

在局部电网结构和电源布局等内部因素已定的情况下, 对于局部电网某一分群模式, 解列后局部电网等值 OMIB 电气功率曲线就已经确定, 是稳态运行时局部电网等值 OMIB 电磁功率曲线平移  $\Delta P_e = (M_A P_{SR} - M_S P_{AR}) / M_T$  的结果。基于解列后局部电网等值 OMIB 电气功率曲线, 结合稳态运行时的机械功率  $P_m$ , 对于  $P_m \geq P_{eT0+}$  的情况, 可以确定解列后局部电网首摆加速面积积分计算的终点功角、最大减速面积积分计算的起始点功角  $\delta_{SAp}$  和终点功角  $\delta_{SAu}$ ; 对于  $P_m < P_{eT0+}$  的情况, 可以确定最大减速面积积分计算的终点功角  $\delta_{SAu}$ 。因此, 稳态运行时局部电网与外部的功率交换情况对解列后局部电网的首摆稳定性有重要影响,  $\Delta P_e$  增大对首摆稳定性不利; 从  $\Delta P_e$  的表达式可见, 仅根据局部电网与外部交换功率大小和方向变化情况, 不能判断首摆稳定性的变化趋势, 分析这些变化对  $\Delta P_e$  的影响情况, 要结合局部电网解列后的分群模式进行分析才能确定。

如前所述, 解列后局部电网首摆加速面积积分计算的起始等值功角  $\delta_{SAT0+}$  (对应  $P_m \geq P_{eT0+}$ ) 和最大减速面积积分计算的起始等值功角  $\delta_{SAT0+}$  (对应  $P_m < P_{eT0+}$ ), 与解列触发前的等值功角  $\delta_{SAT0-}$  相同, 其与解列前的扰动情况和解列时机紧密相关。在稳态运行时局部电网与外部交换功率确定的情况下,  $\delta_{SAT0+}$  变化趋势对首摆稳定性的影响趋势与解列后局部电网等值 OMIB 系统的机械功率  $P_m$  和电气输出功率  $P_{eT0+}$  的大小有关, 如果  $P_m \geq P_{eT0+}$ , 则随着  $\delta_{SAT0+}$  增大, 首摆加速面积减小, 因而稳定性提高; 如果  $P_m < P_{eT0+}$ , 则随着  $\delta_{SAT0+}$  增大, 首摆最大减速面积减小, 因而稳定性降低。

### 4 算例仿真分析

采用电力系统安全稳定量化分析与决策优化软件 FASTEST 作为仿真工具, 进行仿真分析。

#### 4.1 等值小电网仿真分析

##### 4.1.1 $\Delta P_e < 0$ 情况

建立图 5 所示三区域联网小系统, 初始潮流分部如图所示。母线 1—母线 B 线路发生 N-1 故障, 0.3 s 切除故障线路, 导致发电机 1 相对发电机 2 与 3 失稳, 在不同时刻解列“母线 1—母线 A 和母线 1—母线 B”组成的断面时, 发电机 2 和发电机 3 组成的分区电网暂态稳定情况如图 6 和图 7 所示。

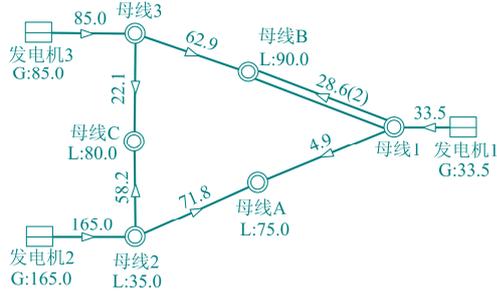


图 5 三区域互联电网

Fig. 5 Three regional interconnected power grid

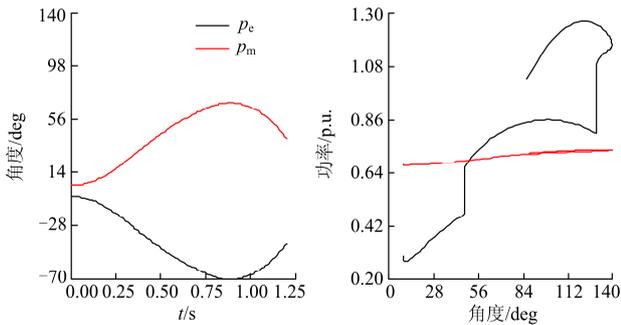


图 6 0.54 s 解列失步断面后分区电网稳定性

Fig. 6 Stability of partition grid after splitting in 0.54 s

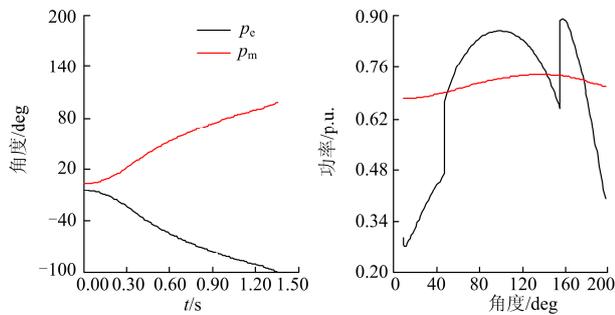


图 7 0.64 s 解列失步断面后分区电网稳定性

Fig. 7 Stability of partition grid after splitting in 0.64 s

可见, 将区域 1 从主网解列之后, 使得剩余主网的电气功率曲线上移, 增加了减速面积, 使得系统功角趋于稳定; 如果解列时刻较晚(如图 7), 分区电网积蓄的初始动能较大, 系统稳定性变差。

##### 4.1.2 $\Delta P_e > 0$ 情况

典型网架和初始潮流如图 8 所示, 母线 2—母线 C 线路发生 N-1 故障, 0.14 s 切除故障线路后, 发电机 1 相对发电机 2 与 3 失稳, 在 0.2 s 和 0.4 s 切除失步断面(母线 1—母线 A 和母线 1—母线 B)后, 发电机 2 和发电机 3 组成的分区电网暂态稳定情况如图 9 和图 10 所示。

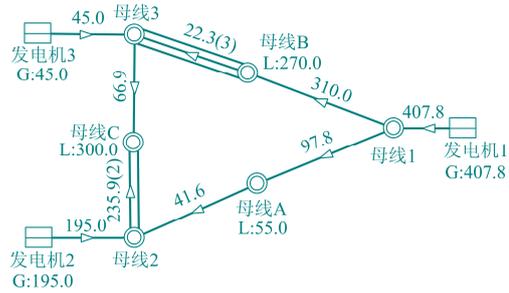


图 8 三区域互联电网

Fig. 8 Three regional interconnected power grid

可见, 将区域 1 从主网解列之后, 使得区域 2 和 3 的电磁功率曲线下移, 增加大加速面积(图 9)或减小了减速面积(图 10), 不利于系统稳定。

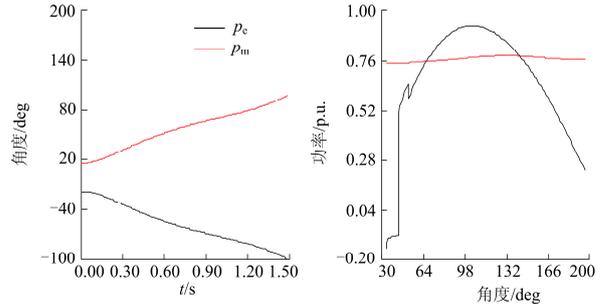


图 9 0.2 s 解列失步断面后分区电网稳定性

Fig. 9 Stability of partition grid after splitting in 0.2 s

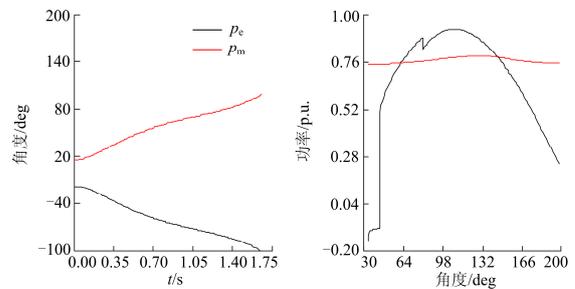


图 10 0.4 s 解列失步断面后分区电网稳定性

Fig. 10 Stability of partition grid after splitting in 0.4 s

## 4.2 大电网仿真分析

基于南方电网典型方式分析解列后分区电网稳定性, 其网架结构如图 11 所示。

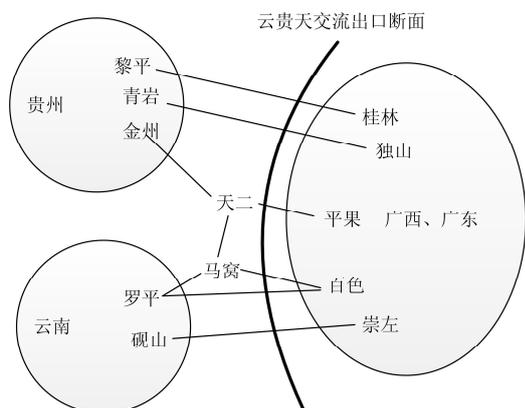


图 11 南方电网结构简图

Fig. 11 Diagram of China southern power grid

典型方式下, 天二—平果和七甸—罗平线路同时发生  $N-2$  故障时, 云南和贵州电网相对主网失稳, 振荡中心落在图 11 所示云贵天交流出口断面。在 0.61 s 和 0.67 s 解列失步断面后, 云贵分区电网首摆暂态稳定性如图 12 所示。

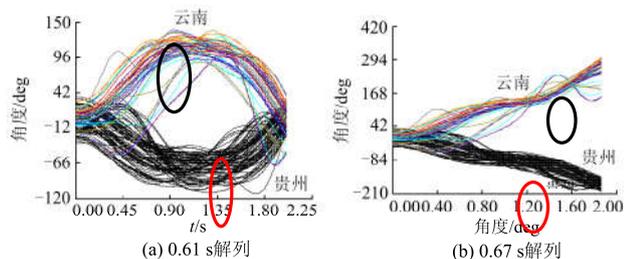


图 12 不同时刻解列后云贵分区电网暂态稳定性

Fig. 12 Stability of Yun-Gui power grid after splitting at different time

在不同解列时刻下云贵分区电网等值功率—功角响应曲线如图 13 所示。可见, 解列时刻  $\Delta P_e < 0$ , 解列操作使得电气功率曲线上移, 减小了加速面积

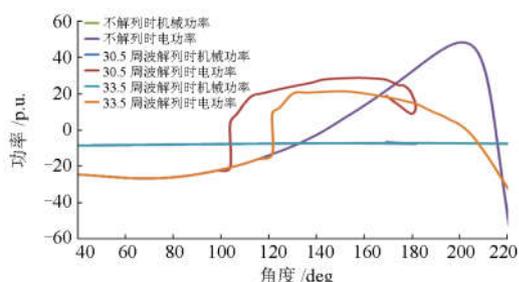


图 13 不同时刻解列后云贵分区电网等值功角-功率曲线

Fig. 13  $\delta_{SA} - P$  curve of Yun-Gui power grid after splitting at different time

的同时还增加了减速面积, 提高了系统稳定性, 如果解列及时, 使得减速面积大于加速面积, 系统能保持功角稳定(如在 0.61 s 执行解列), 但是, 若解列时刻较晚, 系统积累的动能较大, 系统将失步(如在 0.67 s 执行解列)。

## 5 结语

本文探讨解列后局部电网首摆失稳机理, 明晰关键影响因素, 对于确保解列后局部电网功角稳定, 缩减事故影响范围、降低损失, 有重要参考价值。

本文研究表明: 解列时刻局部电网等值 OMIB 系统的初始动能和解列扰动引入的加速面积叠加, 如果小于首摆最大减速面积, 则解列后局部电网功角首摆失稳。解列时局部电网 OMIB 系统的初始动能和解列后局部电网 OMIB 系统的初始运行点, 与解列前的扰动情况(包括初始故障、后续故障和解列外的其他控制措施)以及解列时机密切相关; 解列前局部电网与外部的功率交换情况, 是影响解列后局部电网 OMIB 系统首摆的加速面积和最大减速面积的重要因素之一。解列前局部电网与外部的功率交换情况、解列前的扰动情况和解列时机, 对解列后局部电网功角首摆稳定性有着至关重要的影响。

局部电网内部因素的影响情况、局部电网功角失稳的快速识别及其预防措施优化, 是值得进一步研究的问题。

## 参考文献

- [1] 顾卓远, 汤涌, 孙华东, 等. 区域电网内弱联机群摆动对互联系统功角稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1336-1343.  
GU Zhuoyuan, TANG Yong, SUN Huadong, et al. The effect of the angle swing of weak-connection generator groups in a regional grid to the angle stability of the interconnected power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1336-1343.
- [2] 汤涌, 顾卓远. 区域电网远端故障引发互联系统稳定破坏现象探究[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 154-159.  
TANG Yong, GU Zhuoyuan. A study on effect of fault occurred in remote end of regional power grid on transient stability of interconnected power system[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 154-159.
- [3] 屠竞哲, 张健, 吴萍, 等. 多送出直流系统送端故障引发稳定破坏机理分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 146-151.  
TU Jingzhe, ZHANG Jian, WU Ping, et al. Mechanism analysis on instability caused by sending-side contingencies of multiple HVDC sending systems[J]. Automation of

Electric Power Systems, 2015, 39(20): 146-151.

[4] 赵红生, 刘源, 陈伟彪, 等. 互联电力系统联络线功率波动机理及其扰动概率分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 1-9.  
ZHAO Hongsheng, LIU Yuan, CHEN Weibiao, et al. Fluctuation mechanism of tie-line active power of interconnected power system and its oscillation probability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 1-9.

[5] 陆勇, 张文朝, 张祥成, 等. 解列后孤岛电网电压失稳机理探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 81-86.  
LU Yong, ZHANG Wenchao, ZHANG Xiangcheng, et al. Study on mechanisms of voltage instability in islanding grid after fault disconnection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 81-86.

[6] XUE Y. Unstable modes and the critical mode of transient stability-mechanisms and identification[C] // Proceedings of 5th Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, October, 1996, Recife, Brazil.

[7] 杨卫东, 薛禹胜, 荆勇, 等. 用 EEAC 分析南方电网中一个难以理解的算例[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 23-26.  
YANG Weidong, XUE Yusheng, JING Yong, et al. Analyzing an intricate case of the South China power grid using EEAC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 23-26.

[8] XUE Y. Practically negative effects of emergency controls[C] // IFAC/CIGRE Symposium on Control of Power Systems and Power Plants, August 18-21, 1997, Beijing, China: 134-138.

[9] 潘学萍, 薛禹胜, 王红印, 等. 远离故障点的机组失稳现象及其控制负效应[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 18-21, 54.  
PAN Xueping, XUE Yusheng, WANG Hongyin, et al. Critical generators far from fault location and the negative control effects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 18-21, 54.

[10] 任先成, 李威, 薛禹胜, 等. 互联电网失稳模式演化现象及其影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 9-16.  
REN Xiancheng, LI Wei, XUE Yusheng, et al. Unstable modes evolution and its influencing factors analysis in interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 9-16.

[11] 方勇杰. 电力系统的自适应解列控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 41-44.  
FANG Yongjie. Adaptive islanding control of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 41-44.

[12] 杨浩, 张保会, 宋云亭, 等. 解列后孤岛频率电压相互作用仿真及机理探讨[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3503-3508.  
YANG Hao, ZHANG Baohui, SONG Yunting, et al. Simulation and discussion on mechanism of dynamic interaction between frequency and voltage in islanded power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3503-3508.

[13] 常海军, 霍超, 李威, 等. 基于解列信息触发的孤立电网紧急控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 27-35.  
CHANG Haijun, HUO Chao, LI Wei, et al. Research on emergency control scheme of isolated power grid based on splitting information triggering[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 27-35.

[14] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1999.

收稿日期: 2016-06-19; 修回日期: 2016-09-29

作者简介:

李碧君(1966—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: libijun@sgepri.sgcc.com.cn

刘福锁(1981—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: liufusuo@sgepri.sgcc.com.cn

吴雪莲(1989—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: wuxuelian@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)