

# 深圳抽水蓄能电站失步解列策略研究

程维杰<sup>1</sup>, 庞学跃<sup>2,✉</sup>, 刘昊一<sup>2</sup>

(1. 深圳供电局有限公司, 深圳 518000; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 深圳抽水蓄能电站的投产, 减轻了深圳地区供电压力, 减少火电及西电的调峰幅度, 有利于新能源发电的接入。[方法] 由于深圳抽水蓄能电站存在多种运行方式, 为了校验深圳抽水蓄能电站并网后电力系统稳定性, 通过深蓄电站在夏大方式、夏小方式、冬大方式、冬小方式4种运行方式下的运行方式进行仿真, 研究电力系统受到严重故障扰动后的稳定情况和稳定控制措施。[结果] 根据仿真结果提出了深蓄电站失步解列装置配置两套定值方案的建议, 深蓄电站4台机组通过220 kV远蓄线路并网时, 电压定值整定为0.7 pu, 其它方式下, 电压定值整定为0.5 pu, 保障抽水蓄能电站在各种工况下发生系统故障后能够及时解列机组, 保证系统的安全稳定。[结论] 稳定分析的结果为系统运行人员提供了参考, 部分研究结果已应用于现场设备的实际运行。

**关键词:** 失步解列; 第三道防线; 整定; 安全稳定

中图分类号: TM7; TM743

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)S2-0050-06

开放科学(资源服务)二维码:



## Study on Out-of-step Separation Strategy of Shenzhen Pumped Storage Power Station

CHENG Weijie<sup>1</sup>, PANG Xueyue<sup>2,✉</sup>, LIU Haoyi<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] With the putting into operation of Shenzhen Pumped Storage Power Station, the pressure of power supply in Shenzhen area will be reduced, the peak regulation range of thermal power and Western power will be reduced, the grid connected new energy generation will be promoted. [Method] Due to the various operating modes of Shenzhen Pumped Storage Power Station, in order to verify the stability of the power system after Shenzhen Pumped Storage Power Station grid connected, the operation modes were simulated under four operation modes: maximum operating plan in summer, minimum operating plan in summer, maximum operating plan in winter, minimum operating plan in winter, and the stability and control measures of the power system after serious fault disturbance were studied. [Result] According to the simulation results, two sets of setting value schemes are proposed for the out of step splitting device of Shenzhen Pumped Storage Power Station. When four units of the power station are connected to the grid through the 220 kV Yuan-Xu lines, the setting value of the voltage is set to 0.7 pu. In other modes, the setting value of the voltage is set to 0.5 pu, so as to ensure the units can be split timely and ensure the safety and stability of the system after power system failure under various conditions. [Conclusion] The results of stability analysis provide a reference for operators, and some of the research results have been applied to the actual operation of field equipment.

**Key words:** out-of-step separation; third line of defense; setting; safety and stability

深圳电网2018年统调最高负荷17.2 GW, 全年累计供电量达到88.9 TWh, 同比增长超过4.0%。2019年深圳电网最高统调负荷达到19.1 GW, 同比

增长超过11.0%<sup>[1]</sup>, 负荷增长点主要集中在福田、南山、光明、大鹏新区等地。深圳蓄能电站装机容量4×300 MW, 投运后减轻深圳地区供电压力, 减少火电及西电的调峰幅度, 使调度手段更加丰富, 能够有效促进核电和新能源接入, 提升了电网坚强可靠性。

收稿日期: 2019-12-19 修回日期: 2020-04-25

基金项目: 中国能建广东院科技项目“电力系统安全稳定控制技术的研究及应用”(EX05511W)

在某些严重故障扰动下, 深蓄电站存在机组功角失稳的情况, 需要通过失步解列装置解列机组, 防止系统崩溃, 避免造成大面积长时间停电。根据计算分析的目的, 针对系统运行中实际可能出现的不利情况, 设定系统接线和运行方式<sup>[2]</sup>。考虑不同季节最大或最小开机、抽水蓄能不同运行工况、最大或最小负荷等情况<sup>[3]</sup>。在电网的运行时分析本电网各种可能的失步振荡模式, 制定失步振荡解列方案, 配置自动解列装置<sup>[4]</sup>。

本文对深圳电网夏大、夏小、冬大、冬小四个典型运行方式, 进行故障仿真分析, 研究深蓄电站的发电机和泵工况下的机组失步特性, 分析对系统的影响, 提出了失步解列的策略建议, 保障各种工况下系统的安全稳定运行。

## 1 运行方式和仿真模型

### 1.1 运行方式

根据深圳电网的电力和电量需求预测, 以及电力电量平衡分析, 500 kV 深圳站主变并列运行, 独立成片供电; 为限制短路电流, 宝安换流站主变分母运行<sup>[5]</sup>。大方式下深蓄4台机组分厂运行, 如图1所示, 2台机组通过220 kV 远丰变电站接入500 kV 宝安换流站, 另外2台机组通过220 kV 线路接入500 kV 深圳变电站。小方式下深蓄4台机组合厂泵工况运行, 4台机组通过220 kV 线路接入宝安换流站。

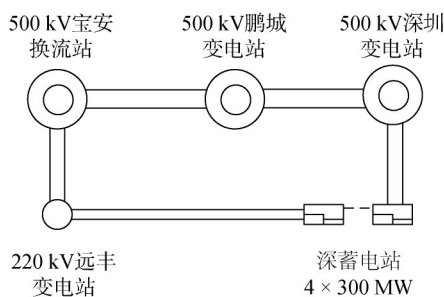


图1 深圳蓄能电站并网运行方式

Fig. 1 Grid-connected operation mode of Shenzhen pumped storage power station

### 1.2 仿真模型

发电机采用次暂态模型, 并计及自动励磁调节器、汽轮机、调速器的作用。属于深圳电网以及在深圳电网运行密切相关的机组, 根据励磁参数实测报告和PSS现场试验报告的设置参数。

负荷采用综合模型, 取50%电动机负荷、50%

恒阻抗负荷。

对各种方式下的深蓄电站失步特性进行仿真, 研究失步特性规律, 提出失步解列策略。

### 1.3 故障选取

为了深入了解电站的失步特性, 系统故障类型选取蓄能电站两回220 kV送出线一回发生三相短路故障, 同时另一回发生单相瞬时性故障, 重合闸成功。

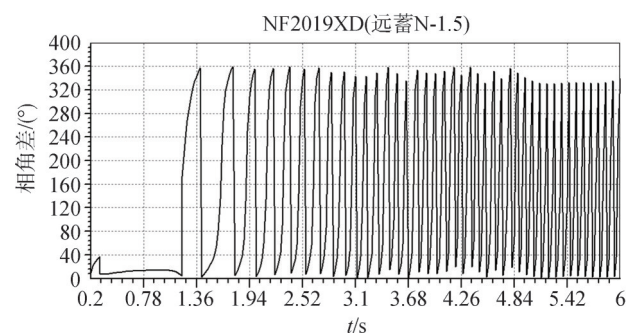
## 2 稳定仿真分析

### 2.1 夏大方式

#### 1) 分母运行远蓄线情况

夏季大方式下深蓄2台机组通过220 kV 远丰变电站接入500 kV 宝安换流站, 另外2台机组通过220 kV 线路接入500 kV 深圳变电站。电站运行在发电机工况。

220 kV 远蓄线一回发生三相短路故障(如图2所示), 同时另一回发生单相瞬时性故障, 重合闸成功, 接入远丰站的两台机组失稳, 根据振荡特性分析, 振荡中心在机组升压变内。



注: 一线路SZX3[15.8--SZXUNENB[220]两侧相角差(°)。

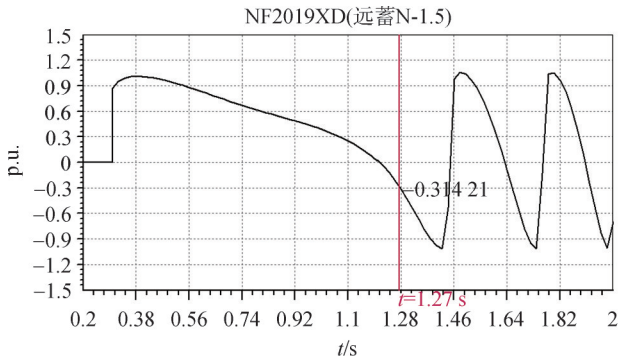
图2 远蓄线故障相角差曲线图

Fig. 2 The phase difference curve of Yuan-Xu lines fault

$U\cos\varphi$  的变化范围可以划分为7个区, 振荡发生的时候  $U\cos\varphi$  逐级穿过每个区。失步继电器快跳段需要逐级穿过7个区域, 慢跳段需要穿过其中4个区域<sup>[6]</sup>。

如图3和图4所示, 根据  $U\cos\varphi$  曲线图分析, 故障完成第一个振荡周期的时间是故障后1.27 s左右, 此过程深蓄电站母线的最低电压值是0.29 pu, 发生时间为故障后1.20 s左右。

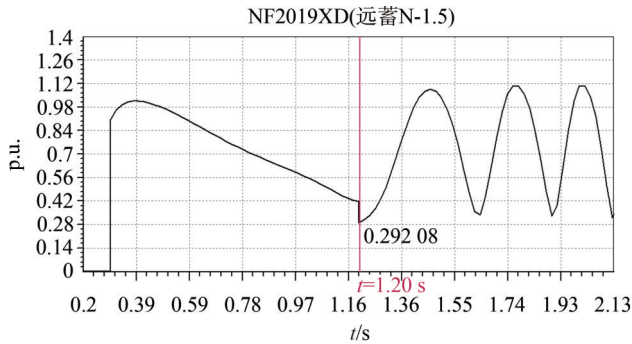
如图5和图6所示, 根据  $U\cos\varphi$  曲线图分析, 故障完成第二个振荡周期的时间是故障后1.66 s左右, 第二周期内深蓄电站母线的最低电压值是0.34 pu。



注:—线路SZXUNENB[220]-YUANFENG[220](2) $U_{cos\varphi}$ (p.u.)。

图3 远蓄线故障 $U_{cos\varphi}$ 曲线图

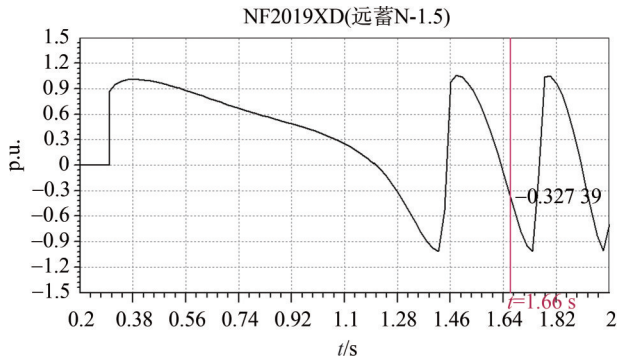
Fig. 3 The  $U_{cos\varphi}$  curve of Yuan-Xu lines fault



注:—母线SZXUNENB[220]正序电压(p.u.)。

图4 远蓄线故障蓄能电站母线电压曲线图

Fig. 4 The busbar voltage curve of Yuan-Xu lines fault



注:—线路SZXUNENB[220]-YUANFENG[220](2) $U_{cos\varphi}$ (p.u.)。

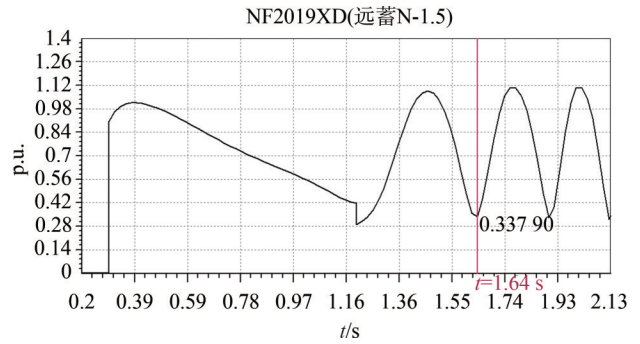
图5 远蓄线故障第二振荡周期 $U_{cos\varphi}$ 曲线图

Fig. 5 The  $U_{cos\varphi}$  curve of Yuan-Xu lines fault during the second out-of-step oscillation period

据上所述,失步一周期的判断时间为1.27 s,失步一周期内深蓄电站母线最低电压为0.29 pu;两周期的判断时间为1.66 s,第二失步周期内深蓄电站母线最低电压为0.34 pu。

2) 分母运行深蓄线情况

220 kV 深蓄线一回发生三相短路故障,同时另



注:—母线SZXUNENB[220]正序电压(p.u.)。

图6 远蓄线故障第二振荡周期蓄能电站母线电压

Fig. 6 The busbar voltage curve of Yuan-Xu lines fault during the second out-of-step oscillation period

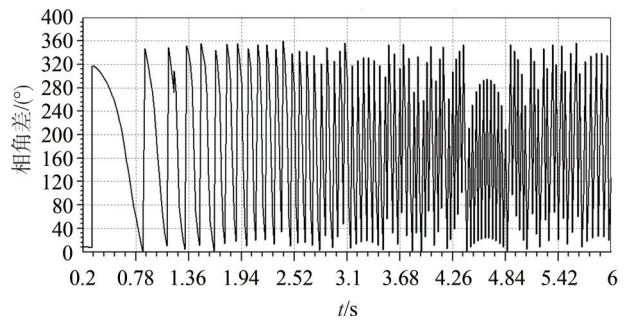
一回发生单相瞬时性故障,重合闸成功,系统稳定。

2.2 夏小方式

1) 合母运行向宝安片区送电

夏季小方式深蓄4台机组通过220 kV远丰变电站接入500 kV宝安换流站。电站运行在泵工况。

如图7所示,220 kV远蓄线一回发生三相短路故障,同时另一回发生单相瞬时性故障,重合闸成功,机组失稳,根据振荡特性分析,振荡中心在220 kV远蓄线内。



注:—线路SZXUNENB[220]-YUANFENG[220](1)两侧相角差(°)。

图7 远蓄线故障相角差曲线图

Fig. 7 The phase difference curve of Yuan-Xu lines fault

根据计算,失步一周期的判断时间为0.66 s,失步一周期内深蓄电站母线最低电压为0.66 pu;两周期的判断时间为1.02 s,第二失步周期内深蓄电站母线最低电压为0.74 pu。

2) 合母运行向深圳片区送电

夏季小方式深蓄4台机组通过220 kV线路接入500 kV深圳变电站。电站运行在泵工况。

220 kV 深蓄线一回发生三相短路故障,同时另

一回发生单相瞬时性故障, 重合闸成功, 机组失稳, 根据振荡特性分析, 振荡中心在升压变内。

根据计算, 失步一周期的判断时间为 0.80 s, 失步一周期内深蓄电站母线最低电压为 0.45 pu; 两周期的判断时间为 1.13 s, 第二失步周期内深蓄电站母线最低电压为 0.53 pu。

#### 3) 分母运行远蓄线情况

夏季小方式深蓄 2 台机组通过 220 kV 远丰变电站接入 500 kV 宝安换流站, 另外 2 台机组通过 220 kV 线路接入 500 kV 深圳变电站。电站运行在泵工况。

220 kV 远蓄线一回发生三相短路故障, 同时另一回发生单相瞬时性故障, 重合闸成功, 机组失稳, 根据振荡特性分析, 振荡中心在升压变内。

根据计算, 失步一周期的判断时间为 0.79 s, 失步一周期内深蓄电站母线最低电压为 0.39 pu; 两周期的判断时间为 1.13 s, 第二失步周期内深蓄电站母线最低电压为 0.46 pu。

#### 4) 分母运行深蓄线情况

夏季小方式深蓄 2 台机组通过 220 kV 线路接入 500 kV 深圳变电站, 另外 2 台机组通过 220 kV 远丰变电站接入 500 kV 宝安换流站。电站运行在泵工况。

220 kV 深蓄线一回发生三相短路故障, 同时另一回发生单相瞬时性故障, 重合闸成功, 系统稳定。

### 2.3 冬大方式

#### 1) 分母运行远蓄线情况

冬季大方式下深蓄 2 台机组通过 220 kV 远丰变电站接入 500 kV 宝安换流站, 另外 2 台机组通过 220 kV 线路接入 500 kV 深圳变电站。电站运行在发电机工况。

220 kV 远蓄线一回发生三相短路故障, 同时另一回发生单相瞬时性故障, 重合闸成功, 机组失稳, 根据振荡特性分析, 振荡中心在升压变内。

根据计算, 失步一周期的判断时间为 1.28 s, 失步一周期内深蓄电站母线最低电压为 0.26 pu; 两周期的判断时间为 1.66 s, 第二失步周期内深蓄电站母线最低电压为 0.29 pu。

#### 2) 分母运行深蓄线情况

冬季大方式下深蓄 2 台机组通过 220 kV 线路接入 500 kV 深圳变电站, 另外 2 台机组通过 220 kV 远

丰变电站接入 500 kV 宝安换流站。电站运行在发电机工况。

220 kV 深蓄线一回发生三相短路故障, 同时另一回发生单相瞬时性故障, 重合闸成功, 系统稳定。

### 2.4 冬小方式

#### 1) 合母运行向宝安片区送电

冬季小方式深蓄 4 台机组通过 220 kV 远丰变电站接入 500 kV 宝安换流站。电站运行在泵工况。

220 kV 远蓄线一回发生三相短路故障, 同时另一回发生单相瞬时性故障, 重合闸成功, 机组失稳, 根据振荡特性分析, 振荡中心在 220 kV 远蓄线内。

根据计算, 失步一周期的判断时间为 0.65 s, 失步一周期内深蓄电站母线最低电压为 0.65 pu; 两周期的判断时间为 1.01 s, 第二失步周期内深蓄电站母线最低电压为 0.73 pu。

#### 2) 合母运行向深圳片区送电

冬季小方式深蓄 4 台机组通过 220 kV 线路接入 500 kV 深圳变电站。电站运行在泵工况。

220 kV 深蓄线一回发生三相短路故障, 同时另一回发生单相瞬时性故障, 重合闸成功, 机组失稳, 根据振荡特性分析, 振荡中心在升压变内。

根据计算, 失步一周期的判断时间为 0.79 s, 失步一周期内深蓄电站母线最低电压为 0.41 pu; 两周期的判断时间为 1.14 s, 第二失步周期内深蓄电站母线最低电压为 0.50 pu。

#### 3) 分母运行远蓄线情况

冬季小方式深蓄 2 台机组通过 220 kV 远丰变电站接入 500 kV 宝安换流站, 另外 2 台机组通过 220 kV 线路接入 500 kV 深圳变电站。电站运行在泵工况。

220 kV 远蓄线一回发生三相短路故障, 同时另一回发生单相瞬时性故障, 重合闸成功, 机组失稳, 根据振荡特性分析, 振荡中心在升压变内。

根据计算, 失步一周期的判断时间为 0.78 s, 失步一周期内深蓄电站母线最低电压为 0.41 pu; 两周期的判断时间为 1.12 s, 第二失步周期内深蓄电站母线最低电压为 0.46 pu。

#### 4) 分母运行深蓄线情况

冬季小方式深蓄 2 台机组通过 220 kV 线路接入 500 kV 深圳变电站, 另外 2 台机组通过 220 kV 远丰变电站接入 500 kV 宝安换流站。电站运行在泵

工况。

220 kV 深蓄线一回发生三相短路故障，同时另一回发生单相瞬时性故障，重合闸成功，系统稳定。

### 3 失步控制措施及影响

根据仿真计算分析，在各种运行方式和工况

下，电站机组发生失步后，需要采取解列机组措施，以限制事故扩大，防止机组设备损坏。根据计算，当发生失步后需要切除电站所有与系统相联接的机组才能平息失步。计算结果汇总表见表1。

表1 各种故障情况下电站机组失步情况及控制措施

Tab. 1 Out of step simulation results and control measures under various fault conditions

故障线路	一周期时间/s	一周期电压/pu	二周期时间/s	二周期电压/pu	失步控制措施	振荡中心
夏大两机远蓄线	1.27	0.29	1.66	0.34	切2台稳定	升压变内
夏大两机深蓄线	—	—	—	—	系统稳定	—
夏小四泵远蓄线	0.66	0.66	1.02	0.74	切4台稳定	远蓄线内
夏小四泵深蓄线	0.80	0.45	1.13	0.53	切4台稳定	升压变内
夏小两泵远蓄线	0.79	0.39	1.13	0.46	切2台稳定	升压变内
夏小两泵深蓄线	—	—	—	—	系统稳定	—
冬大两机远蓄线	1.28	0.26	1.66	0.29	切2台稳定	升压变内
冬大两机深蓄线	—	—	—	—	系统稳定	—
冬小四泵远蓄线	0.65	0.65	1.01	0.73	切4台稳定	远蓄线内
冬小四泵深蓄线	0.79	0.41	1.14	0.50	切4台稳定	升压变内
冬小两泵远蓄线	0.78	0.41	1.12	0.46	切2台稳定	升压变内
冬小两泵深蓄线	—	—	—	—	系统稳定	—

为消除失步振荡，应装设失步解列控制装置，在预先安排的输电断面，将系统解列为各自保持同步的区域<sup>[7]</sup>。根据以上计算分析结果，深圳抽水蓄能电站需要配置失步解列装置，用于监测送出线路断面。按照重要厂站安全自动装置应双重化配置原则<sup>[8]</sup>，深圳抽水蓄能电站应按双重化原则配置两套失步解列装置。失步解列装置应根据监测安装点的电压、电流变化，准确判别系统发生的失步振荡及振荡中心所在范围，采取解列线路或机组等控制措施<sup>[9]</sup>。

失步解列装置可以整定为一个失步周期或两个失步周期，由于在小方式下泵工况下，通过远丰站并网时，220 kV 远蓄线发生故障后，蓄能电站侧母线电压较高，最低电压到0.66 pu，因此建议设置两套定值，在深蓄电站4台机组通过220 kV 远蓄线路并网时，振荡周期定值整定为1或2周期，电压定值整定为0.7 pu；其它方式下，振荡周期定值整定为1或2周期，电压定值整定为0.5 pu。考虑到及时解列失步机组能够快速平息故障，减少对电网稳定的影响，且  $U\cos\varphi$  在原理和穿区级数具备防误动能力，建议振荡周期定值整定为1

周期。

### 4 结论

重要电源并网后，对电力系统的影响巨大，不仅改变了地区电网的系统网架结构，还会影响系统运行方式，进而改变区域安全稳定控制策略。由于系统严重故障数量众多，特别是考虑到连锁故障后，系统仿真无法遍历穷举，因此在仿真时应结合电网特点和故障经验，采用较为严重的故障情况。制定安全稳定控制策略时，应考虑到所有可能出现的运行方式，安全稳定控制策略应能保证在各种运行方式下的适应性。

本文在研究电站机组失步特性时，考虑了合厂运行和分厂运行方式；采用了夏大方式、夏小方式、冬大方式和冬小方式，对机组的发电工况和抽水工况下进行了系统故障特性分析。根据机组失步振荡特性，制定了失步振荡解列策略。

通过仿真计算，在不同运行方式下失步振荡周期内蓄能电站母线最低电压差异较大，给出了不同运行方式下的两套解列电压定值建议，保障在不同运行方式下系统发生故障后有效解列失步机组，保

证系统的安全稳定,保护了发电机组的设备安全。考虑到电站接入系统点处于高负荷密度地区,建议失步解列装置振荡解列周期设置为1个周期,避免振荡时间过长才解列机组对负荷用户造成过大影响,保障电力用户的供电可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 翁毅选,卢艺,程维杰,等.深圳电网2020年度运行方式[R].深圳:深圳供电局有限公司,2019.  
WENG Y X, LU Y, CHENG W J, et al. Shenzhen power grid operating plan in 2020 [R]. Shenzhen: Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., 2019.
- [2] 国家能源局.电力系统安全稳定计算技术规范:DL/T 1234—2013[S].北京:中国电力出版社,2013.  
National Energy Administration. Technique specification of power system security and stability calculation: DL/T 1234—2013 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [3] 中国南方电网有限责任公司.南方电网安全稳定计算分析导则:Q/CSG 11004—2009[S].广州:中国南方电网有限责任公司,2009.  
China Southern Power Grid Co., Ltd.. Guidelines for safety and stability calculation and analysis of China southern power grid: Q/CSG 11004—2009 [S]. Guangzhou: China Southern Power Grid Co., Ltd., 2009.
- [4] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.电力系统安全稳定控制技术导则:GB/T 26399—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical guide for electric power system security and stability control: GB/T 26399—2011 [S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- [5] 程维杰,刘金生,何晓峰,等.2019年度深圳电网安全稳定控制策及系统改造方案研究报告[R].深圳:深圳供电局有限公司,2019.  
CHENG W J, LIU J S, HE X F, et al. Research report on security and stability control strategy and system upgrading scheme of Shenzhen power grid in 2019 [R]. Shenzhen: Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., 2019.
- [6] 南京南瑞继保电气有限公司.RCS-993B型失步解列装置技术和使用说明书[R].南京:南京南瑞继保电气有限公司.  
Nanjing Nari-relays Electric Co., Ltd.. Technical and operation instructions for RCS-993B out of step splitting device [R]. Nanjing: Nanjing Nari-relays Electric Co., Ltd..
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质

量监督检验检疫总局.电力系统安全自动装置设计规范:GB/T 50703—2011[S].北京:中国计划出版社,2012.

Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Automaticity Equipment for Power System Security: GB/T 50703—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.

- [8] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.继电保护和安全自动装置技术规程:GB/T 14285—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical code for relaying protection and security automatic equipment: GB/T 14285—2006 [S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- [9] 中国南方电网有限责任公司.南方电网电力二次装备技术导则:Q/CSG 1203005—2015[S].广州:中国南方电网有限公司,2015.  
China Southern Power Grid Co., Ltd.. Technical guide for electric power secondary equipments: Q/CSG 1203005—2015 [S]. Guangzhou: China Southern Power Grid Co., Ltd., 2015.

#### 作者简介:



**程维杰**

1982-,男,河南开封人,深圳供电局有限公司,高级工程师,华中科技大学电气工程及其自动化专业学士,主要从事电网调度、规划及智能电网相关研究工作(e-mail)chengweijie@sz.csg.cn。

**程维杰**

#### 庞学跃(通信作者)

1978-,男,河北武强人,中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司教授级高级工程师,武汉大学电力系统及其自动化硕士,主要从事电力系统分析和安全稳定控制研究和设计工作(e-mail)pangxueyue@gedi.com.cn。

#### 刘昊一

1992-,男,河北石家庄人,中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司工程师,新南威尔士大学电气工程及其自动化硕士,主要从事电力系统分析和安全稳定控制研究和设计工作(e-mail)liuhaoyi@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)