

DOI: 10.7667/PSPC152227

# 负荷密集型城市电网低频低压减载配置方案优化研究

程维杰<sup>1</sup>, 何晓峰<sup>1</sup>, 周磊<sup>2</sup>, 周霞<sup>2</sup>

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 负荷密集型城市电网在极端严重故障下可能发生频率、电压崩溃的风险。采用基于轨迹的时域动态仿真方法, 分析深圳电网现有低频低压减载措施存在的问题。在考虑局部地区孤网后低频低压减载方案与全网低频低压减载方案相互协调配合的基础上, 提出既满足全网频率特性要求又适应局部负荷密集型城市电网频率要求的低频低压减载优化方案。仿真结果验证了所提配合原则的合理性和配置方案的可行性。

**关键词:** 低频减载; 低压减载; 城市电网; 优化配置

## Coordination strategy of UFLS and UVLS of load density urban power network

CHENG Weijie<sup>1</sup>, HE Xiaofeng<sup>1</sup>, ZHOU Lei<sup>2</sup>, ZHOU Xia<sup>2</sup>

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

2. NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Frequency and voltage collapse caused by serious failure is a tremendous risk in density urban power network. Trajectory-based time-domain dynamic simulation method is used to analyze the problems of the configuration of under frequency load shedding and under voltage tripping of Shenzhen power system while islanded from the interconnected power system. A scheme for under frequency generator tripping is proposed based on frequency control coordination and optimization to meet both the frequency characteristic requirements of the whole network and regional networks. Simulation results show that the proposed coordination principle and configuration scheme are reasonable and feasible.

**Key words:** UFLS; UVLS; urban power network; optimum distribution

## 0 引言

低频减负荷 UFLS(Under Frequency Load Shedding)、低压减负荷 UVLS(Under Voltage Load Shedding)作为电网安全稳定第三道防线, 是防止电力系统在遭受极其严重故障后导致稳定破坏、发生大面积停电事故的重要技术手段<sup>[1-2]</sup>。现代化城市的正常运转越来越依赖于可靠的电力供应, 一旦发生电力供应瘫痪, 对社会稳定造成的冲击和经济发展造成的损失无法估量<sup>[3]</sup>。负荷密集型城市电网的负荷集中、电气联系紧密, 导致电网短路电流超标问题日趋严重。为限制短路电流, 部分地区 500 kV 主变需分列运行, 削弱了网架结构, 降低了电网的抗风险能力。极端严重故障下, 可能导致部分地区孤网。

针对上述情况, 需要依靠电网第三道防线低频低压减载装置保证地区电网孤网后的稳定运行。但地区电网特别是城市电网的频率特性与全网的频率

特性并不完全相同, 按全网整定的低频减载方案应用到孤网后的城市电网时, 可能会造成低频减载过切或欠切, 需要进一步优化相应的低频低压减载方案<sup>[4-7]</sup>。

本文以深圳电网的紫荆分区为例, 在考虑局部地区孤网后低频低压减载方案与全网低频低压减载方案相互协调配合的基础上, 对原有低频低压减载方案进行优化。

## 1 负荷密集型城市电网的特点及安全问题

### 1.1 供电可靠性要求高

大型城市一般作为经济、文化、或者政治中心, 供电可靠性要求非常高。供电可靠性是指供电系统持续供电能力, 反映了电力工业对国民经济电能需求的满足程度。包括供电可靠率、用户平均停电时间、用户平均停电次数等指标。国际先进城市的用户年平均停电时间一般需小于 60 min, 用户年平均停电次数需小于 0.4 次<sup>[8-10]</sup>。

### 1.2 电网调峰矛盾突出

由于产业结构调整 and 居民生活水平提高,商业、居民负荷比重逐年增加,城市用电负荷对季节和天气敏感度大,增加了城市电网的负荷预测、电网调峰等电力平衡工作的难度。

### 1.3 输电通道相对集中

城市内部土地资源紧张,线路走廊资源匮乏,输电线路多以同塔紧凑型结构为主。电气上虽可能存在多回联络线路,但受制于实际物理通道,部分线路间距较近,自然灾害等因素可能导致多回输电线路同时故障,引发大面积停电。

### 1.4 短路电流超标

城市电网多采用双回路内外环网的结构,电气联系日趋紧密,短路电流超标问题越来越突出。为限制短路电流,需要采取拉停线路、母线分列、解环运行等削弱网架结构的运行方式,大大降低了电网的安全可靠性。

## 2 深圳电网紫荆分区简介及原有的低频低压减载方案

深圳电网为限制短路电流,紫荆分区内的 500 kV 紫荆站 2 台主变分列运行,并与鹏城#3 主变组团运行,如图 1 所示。分区内最大负荷需求 3 900 MW,装机容量为 2 200 MW。若 500 kV 紫荆站单台变检修,则 220 kV 母线并列运行,紫荆站剩余 1 台主变仍与鹏城站#3 主变组团运行,此时紫荆分区内所有负荷仅通过紫荆、鹏城 2 台主变供电,可靠性大为降低,极端情况下,两台主变同时或者相继跳闸,可导致地区孤网。深圳电网原有的低频低压减载方案如表 1 和表 2 所示<sup>[11-12]</sup>。

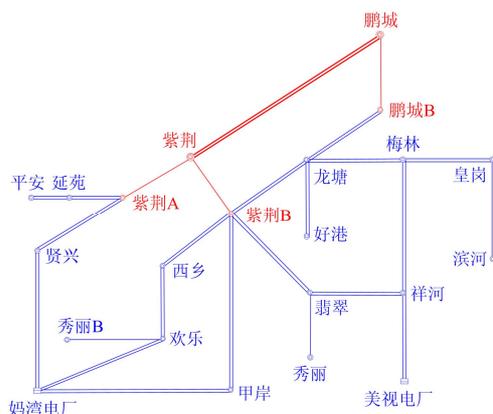


图 1 2015 年深圳电网紫荆分区结构示意图

Fig. 1 Main electrical connection scheme of Zijing regional power network in Shenzhen 2015

表 1 深圳电网紫荆分区低频减载原始方案

Table 1 Original under frequency load shedding scheme of

Zijing regional power network

定值	启动频率/Hz	延时/s	切负荷比例/%
第 1 轮	49.0	0.2	6.0
第 2 轮	48.8	0.2	6.0
第 3 轮	48.6	0.2	6.0
第 4 轮	48.4	0.2	6.0
第 5 轮	48.2	0.2	6.0
第 6 轮	48.0	0.2	6.0
第 7 轮	47.8	0.2	6.0
特 1 轮	48.5	15	3.0
特 2 轮	49.0	20	3.0

表 2 深圳电网紫荆分区低压减载原始方案

Table 2 Original under voltage load shedding scheme of

Zijing regional power network

定值	第 1 轮	第 2 轮
启动电压/p.u.	0.83	0.80
延时/s	0.5	0.5
切负荷比例(%)	15	14

2015 年夏季高峰方式下,500 kV 紫荆站单台变检修,受 N-1 限制,紫荆站剩余 1 台主变和鹏城站#3 主变下网总功率限制在 1 370 MW 以内。两台主变同时跳闸,导致地区孤网,现有低频低压方案下,低频减载动作 4 轮,切除负荷 642 MW,低压减载动作 2 轮,切除负荷 946 MW,共切除负荷 1 588 MW。现有方案导致过切,稳态频率高于 50.5 Hz,频率响应曲线如图 2 所示。

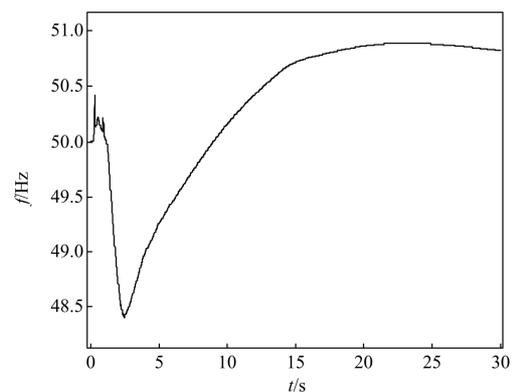


图 2 2015 年夏季高峰方式紫荆分区孤网后频率响应曲线

Fig. 2 Frequency response after Zijing regional power network isolated from main power grid

可见,原有的低频减载方案,仅满足于全网整体运行时的频率安全性要求,个别地区孤网后的频率特性与全网频率特性并不完全相同。按全网整定

的低频减载方案应用到个别地区的孤网电网时, 可能会造成低频减载的过切<sup>[13-14]</sup>。所以需要考虑严重故障导致部分网架薄弱地区孤网的情况, 进一步优化相应的低频低压减载方案。

### 3 深圳电网紫荆分区低频低压减载方案的优化

由于深圳电网属于负荷密集型城市电网, 位于南方电网的大受端, 受电比例较大, 孤网后电压支撑能力不足, 存在低电压问题<sup>[15-18]</sup>, 所以需要配置低压减载装置来保证孤网后的电压稳定。保持现有的低压减载方案不变, 调整后的低频减载方案如表 3 所示。

表 3 深圳电网紫荆分区低频减载改进方案

Table 3 Improved under frequency load shedding scheme of

Zijing regional power network			
定值	启动频率/Hz	延时/s	切负荷比例(%)
第 1 轮	49.0	0.2	6.8
第 2 轮	48.8	0.2	6.1
第 3 轮	48.6	0.2	4.6
第 4 轮	48.4	0.2	4.5
第 5 轮	48.2	0.2	7.2
第 6 轮	48.0	0.2	7.3
第 7 轮	47.8	0.2	6.1
特 1 轮	48.5	15	3.0
特 2 轮	49.0	20	3.0

改进后的低频减载方案动作 4 轮, 切除负荷 506 MW, 低压减载切负荷量不变, 仍为 946 MW。相比原始方案, 改进后的低频减载方案所切负荷量减少, 且稳态频率低于 50.5 Hz, 具体频率响应情况的对比如图 3 和表 4 所示。

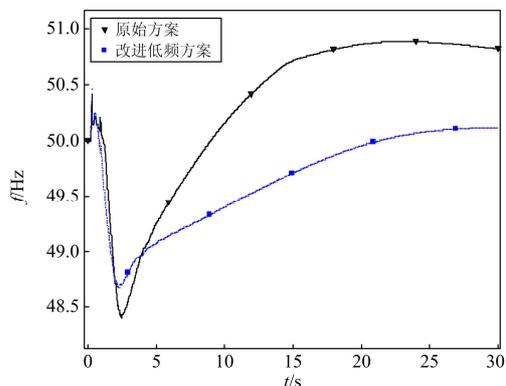


图 3 不同方案下紫荆分区孤网后频率响应曲线

Fig. 3 Frequency response with different schemes after isolated from main power grid

表 4 改进前后低频低压减载方案效果对比

Table 4 Comparison of under frequency load shedding scheme

方案	总切负荷量/MW	最低频率/Hz	恢复频率/Hz
原方案	1 588	48.4	50.9
新方案	1 452	48.7	50.1

由于全网统一的低频减载方案中包含了深圳电网的低频减载方案, 优化后的深圳电网紫荆分区低频减载方案还需要满足全网方案的要求, 保证省级区域电网解列后的安全稳定。全网统一的低频减载方案中, 其他地区的低频减载方案不变, 仅把深圳电网紫荆分区的低频减载方案改为优化后的方案, 基于 2015 年夏季高峰方式, 对全网方案进行校核, 考虑广东交流受入断面全部断开及所有馈入直流全部闭锁, 频率响应曲线如图 4 所示。

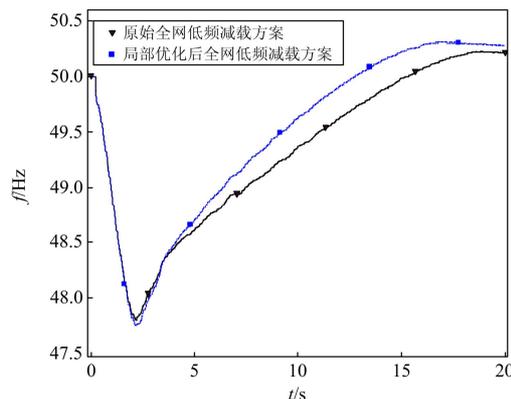


图 4 全网方案优化前后, 广东电网孤网后频率响应曲线

Fig. 4 Frequency response with different schemes after Guangdong power grid isolated from CSG

由于优化后深圳电网紫荆分区的低频减载方案切负荷总量基本不变, 未改变全网统一方案中的切负荷总量, 由全网低频减载方案优化前后的频率响应情况对比可知, 最低频率基本一致。局部优化的深圳电网紫荆分区低频减载方案中适当增加了第 1、2、5、6 轮的切负荷比例, 减少了第 3、4 轮的切负荷比例, 后续轮次切负荷量的增加, 使频率回升较快, 稳态频率较原方案偏高 0.1 Hz, 仍然处于正常范围以内。优化后的方案既满足全网对低频减载的要求, 又适应了地区电网的频率特性, 较好地满足了地区电网孤网后的频率的安全性要求。

## 4 结论

对于互联电网, 一般中央区域的主网架构电气联系较强, 不会发生解列故障; 而且整个系统的负荷也较多地集中在中央区域, 中央区域电网的频率

特性从一定程度上反映了全网的频率特性。所以对电气联系较强的中央区域电网仍可直接采用原有的全网统一低频减载方案, 而对其局部地区, 特别是供电可靠性要求很高的城市电网, 则整定优化为更能适应其频率特性的新方案。该优化方案充分体现了低频减载整定的全局性原则, 既对全网整体的频率特性有较好的适应性, 也充分考虑了地区电网频率特性的特殊性。

本文针对负荷密集型城市电网在极端严重故障下可能发生频率、电压崩溃的风险, 提出了既满足全网频率特性要求又适应局部负荷密集型城市电网频率要求的低频低压减载优化方案, 提高了深圳电网的供电可靠性。

### 参考文献

- [1] DL 755-2001 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] GB/T 26399-2011 电力系统安全稳定控制技术导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [3] 李俊. 深圳电网4·10大停电事件的处理及启示[J]. 南方电网技术, 2014, 8(1): 65-69.  
LI Jun. The processing and inspiration of Shenzhen power grid 4·10 blackout event[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(1): 65-69.
- [4] 陈桥平, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 互联电网的地区频率特性差异性及其对低频减载的影响研究[J]. 中国电力, 2009, 42(8): 1-5.  
CHEN Qiaoping, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. Study on difference of regional frequency characteristics of interconnected power system and its influence on under-frequency load shedding[J]. Electric Power, 2009, 42(8): 1-5.
- [5] 张文亮, 周孝信, 白晓民, 等. 城市电网应对突发事件保障供电安全的对策研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 1-7.  
ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, BAI Xiaomin, et al. Countermeasures against sudden events to ensure the security of urban power supply systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 1-7.
- [6] 杨海涛, 祝达康, 李晶, 等. 特大型城市电网大停电的机理和预防对策探讨[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 128-135.  
YANG Haitao, ZHU Dakang, LI Jing, et al. A discussion on mechanism and countermeasures of blackouts in super megacity power networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 128-135.
- [7] 龚石林, 陈梦涛, 冯彦钊, 等. 智能变电站站域低频减载[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(10): 26-31.  
GONG Shilin, CHEN Mengtao, FENG Yanzhao, et al. Substation area low frequency load shedding in smart substations[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(10): 26-31.
- [8] 刘伟明, 陈健, 刘东升, 等. 广州与国际先进城市电网关键指标对比研究[J]. 华东电力, 2014, 42(7): 1341-1345.  
LIU Weiming, CHEN Jian, LIU Dongsheng, et al. Comparative study on power grid key indicators between Guangzhou and international advanced cities[J]. East China Electric Power, 2014, 42(7): 1341-1345.
- [9] 刘思革, 范明天, 张祖平, 等. 城市电网应急能力评估技术指标的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 17-20.  
LIU Sige, FAN Mingtian, ZHANG Zuping, et al. A prospective research on technical assessment indices of emergency management capability in urban power network[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 17-20.
- [10] 高志远, 姚建国, 郭昆亚, 等. 智能电网对智慧城市的支撑作用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 148-153.  
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, GUO Kunya, et al. Study on the supporting role of smart grid to the construction of smart city[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 148-153.
- [11] 刘洪涛, 曾勇刚, 李建设, 等. 基于频率安全定量分析的南方电网联合低频减载方案[J]. 中国电力, 2007, 40(10): 28-32.  
LIU Hongtao, ZENG Yonggang, LI Jianshe, et al. Study on united under-frequency load shedding scheme of China Southern Power Grid based on frequency security quantitative analysis[J]. Electric Power, 2007, 40(10): 28-32.
- [12] 赵强, 赵良, 马世英, 等. 南方电网系统频率特性及低频减载方案[J]. 中国电力, 2010, 43(5): 7-11.  
ZHAO Qiang, ZHAO Liang, MA Shiying, et al. Frequency characteristics and under-frequency load shedding schemes for China Southern Power Grid[J]. Electric Power, 2010, 43(5): 7-11.
- [13] 王君, 王晓茹, 谢大鹏, 等. 孤岛系统的低频减载方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 29-33.  
WANG Jun, WANG Xiaoru, XIE Dapeng, et al. Investigation of under frequency load shedding on an isolated system[J]. Power System Protection and Control,

- 2010, 38(3): 29-33.
- [14] 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.
- [15] 迟震奎, 崔伟清, 韩金铜. 基于 BPA 的电力系统低压减载的研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(10): 23-28.  
CHI Zhenkui, CUI Weiqing, HAN Jintong. Study on power system under-voltage load shedding based on BPA[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(10): 23-28.
- [16] 张执超, 王增平, 方攀宇. 考虑系统电压影响的低频减载新策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 1-6.  
ZHANG Zhichao, WANG Zengping, FANG Panyu. A new UFLS strategy considering system voltage influence[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 1-6.
- [17] 李晔, 张保会, 薄志谦. 低频低压继电器联合减载方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 48-54.  
LI Ye, ZHANG Baohui, BO Zhiqian. A combined deloading method based on the underfrequency and undervoltage relay[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 48-54.
- [18] 樊艳芳, 钟显, 常喜强, 等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.  
FAN Yanfang, ZHONG Xian, CHANG Xiqiang, et al. Research of the UFLS under the frequency characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 55-60.

---

收稿日期: 2015-12-24; 修回日期: 2016-07-29

作者简介:

程维杰(1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

何晓峰(1979-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

周磊(1982-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: zhoulei@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)