

广州城区电网黑启动方案的分析计算

夏成军¹, 龚建平², 张尧¹, 刘涛²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东电网公司广州供电局, 广东 广州 510620)

摘要: 广州电网存在多种小概率事件引起电网大面积停电的运行风险, 制定广州地区电网特别是城区电网黑启动方案需考虑的特殊问题有: 城区电网黑启动电源少; 电缆线路多, 可能引起过电压; 与省级电网黑启动方案的协调配合; 地区 110kV 电网解环运行、3T 接线多; 调度权限。重点分析和探讨了广州城区电网的多个黑启动路径, 并对其黑启动方案开展了发电机自励磁、工频过电压、合空线过电压、合空变过电压、潮流等方面的详细仿真计算, 综合多种因素给出了广州城区电网黑启动方案的优先级及其前提条件。

关键词: 城区电网; 黑启动; 自励磁; 过电压; 仿真

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)16-0044-05

0 引言

电网黑启动是指整个系统因故障停运后, 不依赖其他网络的帮助, 通过系统中具有自启动能力机组的启动, 带动无自启动能力的机组, 逐步扩大电力系统的恢复范围, 最终实现整个电力系统恢复的过程^[1]。

美加 8·14 大停电事故及其后发生在英国、瑞典、意大利、莫斯科等地的大停电事故引起了国内外电力工作者对于电网安全防御系统、电网恢复等方面的重视。尤其是 2005 年 9 月 26 日台风“达维”引起海南全网大面积停电^[2]、国内首次紧急启用黑启动方案恢复省级电网供电这一事件, 引起人们对于电网黑启动方案的重视。预先编制好的、合理的黑启动方案对于缩短停电时间、减小停电损失能起到巨大作用。

对于广州这样一个区域中心城市, 存在由于自然灾害、恐怖活动、人为破坏、电压崩溃、连锁故障等小概率事件引起电网大面积停电的风险, 因此制定广州地区电网的黑启动方案具有非常重要的现实意义。

在对广州地区电网的黑启动电源和电网结构进行充分调研的基础上, 制定了广州地区电网黑启动子网划分方案及各子网的黑启动方案。本文着重分析归纳广州城区子网黑启动方案的特殊问题, 并介绍制定城区子网黑启动方案过程中开展的发电机自励磁、工频过电压、合空线过电压、合空变过电压、潮流等方面的分析计算工作。

1 广州地区电网黑启动方案概况

广州地区电网黑启动方案的研究对象是 2005 年广州地区电网, 目标是利用本地能够自启动的小水电或火电厂带小网运行, 启动本地机组并逐步恢复地方电网的重要负荷, 同时考虑与广东省网黑启动方案的协调配合, 快速有序地恢复主网架和重要用户供电。在对广州地区电网的黑启动电源、电网结构进行充分调研的基础上, 参照广州地区电网 2005 年度运行方式, 并参考广州的行政区域, 考虑各子网间同期点的设置, 将广州电网划分为番禺子网、黄埔及芳村子网、增城子网、从化子网、城区及花都子网五个子网。各子网的大致地理位置及联网情况如图 1 所示。

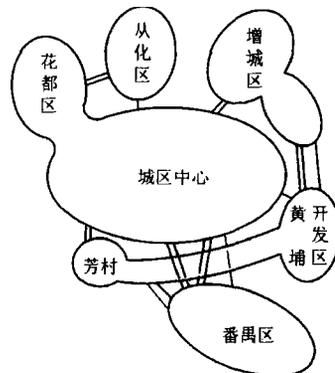


图 1 广州地区电网子网划分

Fig 1 Sub-grid of Guangzhou Regional Power Grid

番禺子网的地方电厂很多, 分别有: 市头电厂、莲花山 AB 厂、砺江电厂、紫坭电厂、梅山电厂和南沙电厂。调查结果表明: 市头电厂、莲花山 AB 厂和南沙电厂具备自启动能力, 且莲花山电厂启动珠江

电厂已列入广东省网黑启动方案。

黄埔开发区及芳村子网电厂云集,有黄埔 A 厂、恒运 BC 厂、明珠 C 厂、明珠 AB 厂、广保电厂等,但仅有明珠 AB 厂具备自启动能力。该子网的黑启动可通过明珠 AB 厂启动明珠 C 厂、恒运 B 厂、恒运 C 厂、黄埔 A 厂等路径启动子网内的电厂,且明珠 AB 厂启动黄埔 A 厂已列入广东省网黑启动方案。

从化子网有较多的水电厂,地方小水电启动后带当地重要负荷,若系统全黑时恰好是在枯水期,则有待省网黑启动成功后恢复当地负荷。

增城子网电厂也比较多,有江龙电厂、新塘电厂和荔城电厂等三座火电厂和若干座水电厂,可通过地方小水电启动荔城电厂和江龙电厂。地方小水电黑启动失败时,有待省网黑启动成功后从增城站接受电力。

城区及花都子网有员村电厂、广州电厂、西柴 A 厂、广盛西柴 B 厂、华辉电厂、巴江电厂和蚌湖电厂等 7 座地方火电厂。调查结果表明这些电厂都不具备自启动能力。

鉴于广州城区及花都子网(以下简称为城区电网)的电网规模大、网络接线复杂、处于城市中心供电区,需对其黑启动方案进行重点分析。

2 广州城区电网黑启动方案

2.1 广州城区电网黑启动的特殊问题

广州城区人口密集,汇聚了众多政府重要部门、外国驻华机构和公司、机场、火车站、地铁、医院、学校等众多企事业单位对供电可靠性要求很高,对大停电后的电网恢复时间有较高要求。因此制定科学合理的广州城区电网黑启动方案有重要的现实意义。

城区电网黑启动方案需要考虑如下特殊问题。

1) 广州城区电网囊括了广州市中心区域和花都区,电网覆盖面广,总共由 15 个辐射状片网组成,城区电网有 7 座地方火电厂,但都不具备自启动能力。电网全停后,需接受省网或其他子网外来电源的支持。

2) 广州地区 110 kV 电网以 3T 结线为主,正常运行方式下,部分网间联络线一侧开关切热备用。黑启动时需要考虑:子网并列同期点;改变片网联络线运行方式,涉及较多的开关倒闸操作。

3) 城区电网中电缆线路较多,可能引起过电压问题。

4) 与广东省网黑启动方案的协调配合问题。广东省网黑启动方案涉及广州地区的有:(1)广州

抽水蓄能电厂黑启动后送电 500 kV 增城站;(2)明珠 AB 厂启动黄埔 A 厂;(3)莲花山电厂启动珠江电厂。地区电网黑启动方案要能有效支持省网黑启动,同时保持一定的独立性和留有备用方案。

5) 调度权限问题。部分电厂的上网方式存在两个或两个以上的电压等级,而不同的电压等级,其调度归属不同的管理部门。制定黑启动方案时需加以考虑,作适当调整。

2.2 广州城区电网黑启动路径

由于广州城区及花都区子网缺少黑启动电源,因此需要接受省网或者其他子网外来电源支持。其黑启动路径初步考虑可有如下 4 个方案。

1) 由省网来提供

在省网黑启动成功后,启动黄埔 B 厂和广州发电厂。其黑启动路径有:500 kV 增城站—220 kV 棠下站—220 kV 碧山站—黄埔 B 厂;珠江电厂—220 kV 瑞宝站—220 kV 赤沙站—黄埔 B 厂;500 kV 北郊站—220 kV 罗涌站—广州发电厂。其前提条件是省网成功黑启动珠江电厂,或 500 kV 北郊站或增城站复压。

2) 由黄埔子网提供

开元站完成对周边发电厂提供厂用电的任务;通过 110 kV 碧开线送电至碧山站的 110 kV 母线;碧山站通过变中开关对主变进行充电;稳定后碧山站再通过 220 kV 母线和 220 kV 黄碧线送电至黄埔 B 厂,供其厂用电。前提条件是黄埔子网黑启动方案成功。

3) 广州发电厂自保厂用电成功。

广州发电厂若能成功自保厂用电,调整机组特性并尽可能的启动其他已停机组,恢复盘福站和流花站部分负荷。然后通过罗涌站 110 kV 母线的中转启动西柴 AB 厂,成功后增加罗涌站、流花站和盘福站的负荷,最后通过罗涌站—郭塘站—嘉禾站—均禾站—茶山站—棠下站—员村热电厂这一系列 110 kV 线路送电至员村热电厂。该方案的前提条件是广州发电厂自保厂用电成功。

4) 市头电厂启动广州发电厂

上述 3 个方案有的需要省网支持,由 500 kV 或 220 kV 变电站供电,有的涉及到省调电厂(如黄埔电厂、珠江电厂)。调度权限的变更可能引起工作的混乱,而延迟黑启动过程。因此立足于地区电网调度权限,提出由市头电厂启动员村电厂和广州电厂的黑启动路径。该方案实际上由番禺子网支持,但不影响番禺子网的黑启动方案,且启动路径完全依靠 110 kV

地区网以及地调电厂。其启动路径如图 2 所示。

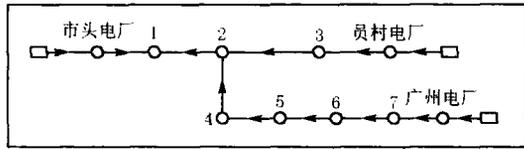


图 2 黑启动路径图

Fig 2 Black-start path

2.3 仿真计算

在制定黑启动方案时需进行发电机自励磁、工频过电压、操作过电压、潮流等方面的分析计算,以保证黑启动方案的现实可操作性。下面以城区电网黑启动方案 4 为例,介绍有关仿真计算工作。

3.3.1 发电机自励磁

按照容量比较法判别发电机是否会发生自励磁。对于发电机带空载长线时,不发生自励磁的工程实用判据^[3]是:

$$W_h > Q_c X_d \quad (1)$$

其中: W_h 为发电机容量(MW); Q_c 为考虑高抗或低抗补偿后的线路剩余充电功率(Mvar); X_d 发电机等值同步电抗(包括升压变漏抗,以发电机为基准的标么值)。

沿图 2 启动路径考虑如下三种情况分别进行发电机自励磁分析计算。

(1)市头电厂启动员村电厂

启动路径:市头电厂 + 1 + 2 + 3 + 员村电厂。

$W_h = 15$ MW (市头电厂开一台 15 MW 机)

$Q_c X_d = 1.59$ Mvar

结论:不会发生自励磁

(2)市头电厂单独启动广州电厂

启动路径:市头电厂 + 1 + 2 + 4 + 5 + 6 + 7 + 广州电厂。

$W_h = 15$ MW (市头电厂开一台 15 MW 机)

$Q_c X_d = 30.22$ Mvar

结论:会发生自励磁

$W_h = 30$ MW (市头电厂开二台 15 MW 机)

$Q_c X_d = 30.22$ Mvar

结论:会发生自励磁

(3)员村电厂启动广州电厂

启动路径:员村电厂 + 3 + 2 + 4 + 5 + 6 + 7 + 广州电厂。

$W_h = 50$ MW (员村电厂开一台 50 MW 机)

$Q_c X_d = 29.3$ Mvar

结论:不会发生自励磁

由以上分析可见,市头电厂开一台 15 MW 机组

可直接启动员村电厂,但开 2 台 15 MW 机组单独启动广州电厂仍然可能发生自励磁。原因在于该启动路径线路长,且部分线路为电缆,充电功率较大。因此在启动过程中必须由市头电厂启动员村电厂一台 50 MW 机组后,再由市头电厂和员村电厂共同启动广州电厂。

2.3.2 工频电压升高

从自励磁分析计算可知,由于该启动路径线路长,空载时线路充电功率较大,因此需要对该路径的线路电容效应引起线路末端电压升高进行分析计算。仿真工具采用 PSCAD/EMTDC,该仿真计算同时验证了发电机自励磁、线路充电电容效应。

列出仿真中的几个典型波形如下。图中机端 $1 \text{ p.u.} = 6.3 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} \text{ kV}$ (市头电厂)或 $1 \text{ p.u.} = 10.5 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} \text{ kV}$ (员村电厂);线路 $1 \text{ p.u.} = 121 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} \text{ kV}$ 。

1)市头开一台 15 MW 机组(市头 + 1 + 2 + 3 + 员村电厂)

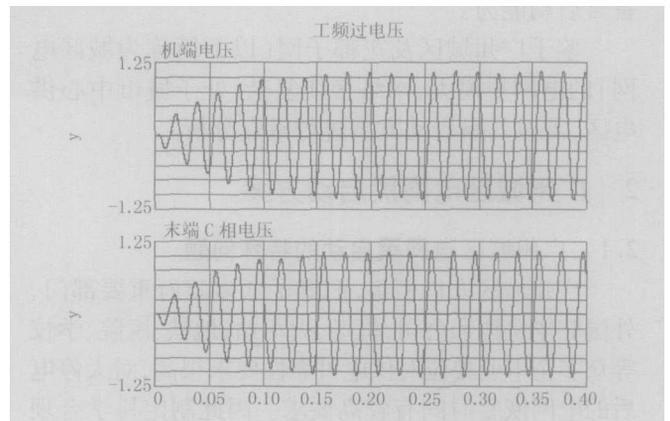


图 3 机端和线路末端电压曲线

Fig 3 Voltage curves of generator end and line end

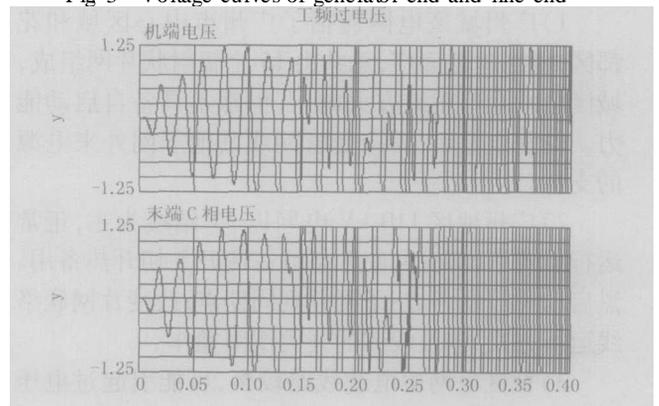


图 4 机端和线路末端电压曲线

Fig 4 Voltage curves of generator end and line end

表 2 广州城区电网黑启动方案

Tab 2 Black start scheme for Guangzhou metropolitan power grid

方案名	优先级	前提条件
方案一:番禺子网支持:由市头电厂启动员村电厂,然后启动广州电厂	—	市头电厂和员村电厂并列运行后方可启动广州电厂
方案二:黄埔子网支持:开元->碧山->黄埔 B 厂	—	前提条件:黄埔子网黑启动方案成功
方案三:由省网提供黑启动电源:北郊->罗涌->广州发电厂;增城->棠下->碧山->黄埔 B 厂;珠江电厂->瑞宝->赤沙->黄埔 B 厂	三	前提条件:省网成功黑启动珠江电厂,或 500 kV 北郊站或增城站复压
方案四:广州发电厂自保厂用电成功,启动西柴电厂和员村电厂	四	前提条件:广州发电厂自保厂用电成功

注:一为最高优先级

3 结语

电网全停后的恢复是一个重要而复杂的过程,必须对黑启动方案进行详细的分析研究和仿真计算,才能保证黑启动方案的实际可操作性,避免启动过程中出现发电机自励磁、过电压等问题而延误电网恢复时间。除技术可行性以外,具体制定黑启动方案时还要综合考虑调度权限、方案可操作性、黑启动所需时间、黑启动方案的前提条件等多种因素,配备多个备用方案并确定其优先级。本文对广州城区电网黑启动方案的分析计算工作可供相关研究工作参考。

参考文献:

- [1] 蔡述涛,张尧,荆朝霞.地区电网黑启动方案的制定[J].电力系统自动化,2005,29(12):73-76
CAI Shu-tao, ZHANG Yao, JING Zhao-xia Discussion

Analysis and simulation on black start scheme for Guangzhou metropolitan power grid

XIA Cheng-jun¹, GONG Jian-ping², ZHANG Yao¹, LIU Tao²

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Power Supply Company, GPG, Guangzhou 510620, China)

Abstract: There are several hidden risks which may lead to large area blackout in Guangzhou power system. Special attentions shall be paid to the following issues when making the black start scheme for Guangzhou regional power grid, especially for Guangzhou metropolitan power grid. There are leak of black start power supply, large amount of cables which may lead to overvoltage, coordination with Guangdong provincial power grid black start scheme, 3T lines connection in 110kV grid, and dispatching power right of power plant and substation. The focus is on the black start scheme for Guangzhou metropolitan sub-grid and various black start paths have been analyzed. Simulations on Guangzhou metropolitan power grid are illustrated, such as generator self-excitation, power frequency over-

(下转第 78 页 continued on page 78)

on the Black Start Scheme of Regional Power Grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 73-76

- [2] 唐斯庆,张弥,李建设,等.海南电网“9.26”大面积停电事故的分析与总结[J].电力系统自动化,2006,30(1):1-7.

TANG Si-qing, ZHANG Mi, LI Jian-she, et al. Review of Blackout in Hainan on September 26th - Causes and Recommendations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7.

- [3] 鲁顺,傅予,金世军.桓仁地区电网黑启动分析[J].东北电力技术,2003,(11):8-11.

LU Shun, FU Yu, JIN Shi-jun. Analysis on Black Start-up of Power Network in Huaren Region [J]. Electric Power Technology of Northeast China, 2003, 11: 8-11.

- [4] DL/T 620-1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].

DL/T 620-1997, Over-voltage Protection and Insulation Cooperation of AC Electric Equipments [S].

- [5] 李广凯,李庚银,等.河北南网全停后利用外网恢复的过电压计算[J].华北电力技术,2005,(6):17-21.

LI Guang-kai, LI Geng-yin, et al. Over-voltage Calculation of Restoration Schemes Utilizing Outside Network When South Hebei Power Network Blackouts [J]. North China Electric Power, 2005, (6): 17-21.

收稿日期: 2006-01-18; 修回日期: 2006-03-27

作者简介:

夏成军(1974-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、HVDC及 FACTS; E-mail: cjxia@scut.edu.cn

龚建平(1964-),男,硕士,高级工程师,从事电力系统运行与管理工作;

张尧(1948-),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统运行分析与控制、电压稳定性等方面的教学与科研工作。

- WANG Cheng-shan, YANG Jun, ZHANG Chong-jian Application of Grey System Theory in City Electricity Demand Forecasting[J]. Power System Technology, 1999, 23(2): 15-18.
- [4] Metaxiotis K, Kagiannas A, Askounis A, et al Artificial Intelligence in Short Term Electric Load Forecasting: a State-of-the-art Survey for the Researcher[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44: 1525-1534.
- [5] 何飞, 张国忠, 刘亚. 基于 BP 网络的改进负荷预测方法[J]. 华东电力, 2004, 32(3): 31-33.
- HE Fei, ZHANG Guo-zhong, LU Ya Improved Load Forecasting Method Based on BP Network[J]. East China Electric Power, 2004, 32(3): 31-33.
- [6] Vapnik V N. The Nature of Statistical Learning Theory [M]. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [7] Vapnik V N. An Overview of Statistical Learning Theory [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(5): 988-999.
- [8] Suykens J A K, Vandewalle J. Least Squares Support Vector Machine Classifiers[J]. Neural Processing Letters, 1999, 9(3): 293-300.
- [9] Suykens J A K, Vandewalle J. Sparse Least Squares Support Vector Machine Classifiers[A]. European Symposium on Artificial Neural Networks Bruges (Belgium): 2000. 37-42.
- [10] 白建社, 盛戈峰, 江秀臣, 等. 基于移动时间窗的直流局部放电特征提取方法[J]. 电力系统自动化, 2005, (3): 55-59.
- BAI Jian-she, SHENG Ge-hao, JIANG Xiu-chen, et al Features Extraction Method of DC Partial Discharge Based on Mobile Time Window[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, (3): 55-59.
- [11] 鲍一丹, 吴燕萍, 何勇. 基于 GM(1,1)模型和线性回归的组合预测新方法[J]. 系统工程理论与实践, 2004, (6): 95-98.
- BAO Yi-dan, WU Yan-ping, HE Yong A New Forecasting Model Based on the Combination of GM(1,1) Model and Linear Regression[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2004, (6): 95-98.
- [12] 董沛武, 李汉铃, 潘慧峰. 基于市盈率模型的风险投资企业价值评估方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2002, (6): 121-125.
- DONG Pei-wu, LI Han-ling, PAN Hui-feng Research on Method of the Venture Capital in Enterprise Price Evaluation on P/E Model[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2002, (6): 121-125.

收稿日期: 2006-02-24; 修回日期: 2006-04-24

作者简介:

王晓红(1976-),女,讲师,硕士研究生,从事电力预测领域的研究; E-mail: wdh_hf_mail@163.com

吴德会(1975-),男,博士研究生,长期从事智能控制、电气工程领域的研究。

Annual electric consumption forecasting model based on least square support vector machines

WANG Xiao-hong¹, WU De-hui^{1,2}

(1. Department of Electronic Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China

2. School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: According to the speciality of electric power consumption development, an improved regression model based on the least squares support vector machine (LS-SVM) is introduced into the field of electric power demand forecasting. The design steps and learning algorithm are also addressed. Compared with forecasting methods based on artificial neural networks(ANN), there are some advantages of the proposed method. First, the LS-SVM solution follows directly from solving a set of linear equations instead of an iterative problem. Second, the machine learning in the standard ANN approach are replaced by linear equations in LS-SVM, so the global optimal solution can be uniquely obtained. Third, the forecasting precision can be enhanced due to the model converts extrapolation regression into interpolation regression. The application case proved that the proposed method is of easy realization, accurate prediction and fits for annual electric power demand forecasting.

Key words: annual electric power demand; least squares support vector machine (LS-SVM); regression; forecasting

(上接第 48 页 continued from page 48)

voltage, line energizing overvoltage, transformer energizing overvoltage and power flow. Finally, the pre-condition & PRO of the black start schemes for Guangzhou metropolitan power grid are listed.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010).

Key words: metropolitan power grid; black start; self-excitation; overvoltage; simulation