

# 地区电网备自投在线投退控制策略(二) 考虑备用电源侧可用供电能力的备自投控制策略

刘若溪<sup>1</sup>, 张建华<sup>1</sup>, 李更或<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206;

2. 北京地铁运营有限公司, 北京 100082)

**摘要:** 由于投入备自投装置时, 没有充分考虑备用电源侧元件热稳定极限的影响或其他相关母线的电压越限情况, 导致连锁故障发生, 会使故障进一步扩大。在考虑备用电源所在电网的网架结构、运行方式以及负荷水平的条件下, 建立了备用电源侧可用输电能力实时在线评估数学模型, 并应用重复潮流法, 对该模型进行了求解, 将所得结果作为备自投装置动作与否的决策依据。对重复潮流方法进行了详细介绍, 并给出了相应的程序流程图。最后利用某地区在线 SCADA 数据对上述方法进行了验证, 结果表明该方法可真实反映备用电源侧的可用输电能力, 整个迭代过程中潮流计算一般在 20 次以内, 适合在线应用。

**关键词:** 地区电网; 备自投; 重复潮流; 可用供电能力; 控制策略

**中图分类号:** TM 762.1; TM 732

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2011)04-0013-04

## 0 引言

为提高供电可靠性, 地区电网往往装设备用电源自动投入装置 BATS (Busbar Automatic Transfer Switch)。当电网发生故障导致母线停电时, 满足动作条件的 BATS 动作, 合上备用电源给停电母线供电, 从而提高供电可靠性<sup>[1-8]</sup>。

地区电网在负荷高峰时, BATS 的动作可能带来备用电源侧的过负荷<sup>[9]</sup>, 因此 BATS 投退控制应充分考虑远方备用电源侧主变的容载比、线路的热稳定极限等约束条件。文献[10]提出的“检和流”过负荷闭锁方案可以解决 BATS 动作导致主变过负荷问题, 但它并不能从电网全局角度考虑备用电源侧过负荷问题。文献[11]为了解决这一问题提出基于  $N-1$  准则的 BATS 投退控制策略, 但此方法并不能实时监测备用电源侧的供电裕度, 无法做到在线应用。

为了解决上述问题, 本文应用重复潮流法, 实时在线评估备用电源侧的可用供电能力, 将所得结果作为备自投装置动作与否的决策依据。文中还对重复潮流方法进行了详细的介绍, 并给出了相应的程序流程图。最后利用某地区在线 SCADA 数据对上述方法进行了验证, 结果表明该方法具有一定的可行性。

## 1 备用电源侧可用供电能力实时在线评估

备用电源侧的可用供电能力一般受多方面因素

影响, 其中最为主要的是备用电源所在地区电网的网架结构及其运行方式以及此地区当前的负荷水平。制定评估算法时必须充分考虑这些影响因素, 才能得到比较符合实际的评估结果。

### 1.1 数学模型

备用电源侧可用供电能力是指: 备用电源所在地区电网在指定运行方式下, 满足所有母线节点电压约束以及所有支路功率约束的条件时, 备用电源侧所能提供的最大功率与当前所供负荷之差。其由地区电网的运行方式和负荷增长模式共同决定。

根据以上叙述, 表示备用电源侧可用供电能力的数学表达式为

$$S_r = S_{\max} - S_0 \quad (1)$$

$$S_{\max} = S_0 + m S_u \quad (2)$$

其中,  $S_r$  为在当前网络结构与负荷水平下, 备用电源侧所能提供的最大功率与当前所供负荷之差, 即备用电源侧可用供电能力;  $S_{\max}$  为备用电源侧所能提供的最大功率;  $S_0$  为备用电源侧当前实际负荷;  $m$  为一实数, 在  $S_u = S_0$  的前提下代表负荷增长倍数;  $S_u$  为负荷增长步长, 本文取  $S_u = S_0$ 。

约束条件包括潮流约束、节点电压约束以及导线和变压器支路的容量约束, 即

$$YU = I \quad (3)$$

$$U_{il} \leq U_i \leq U_{iu} \quad (4)$$

$$i_i \leq i_{i\max} \quad (5)$$

$$S_i \leq S_{i\max} \quad (6)$$

其中,  $Y$  为节点导纳矩阵,  $U$  为节点电压向量,  $I$  为所有节点的复电流注入向量;  $U_{il}$ 、 $U_{iu}$  和  $U_i$  分别为节点  $i$  的电压及其上、下限;  $i_i$  和  $i_{i\max}$  为各支路流过的电流和其允许通过的最大电流;  $S_i$  和  $S_{i\max}$  为各变压器支

收稿日期: 2010-05-18; 修回日期: 2011-01-10

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50877026)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50877026)

路流出的功率值和最大允许容量。

### 1.2 在线评估算法

对备用电源侧可用供电能力进行实时评估,即求取  $S_r$ , 必须首先求  $S_{\max}$ 。  $S_{\max}$  的求解实质上是在给定的运行方式及负荷增长模式下求取一临界点的问题,在该临界点恰好有一约束起作用,当负荷有一微小增长,继续增加负荷时将有越限发生,该临界点就对应着评估区域的最大输电能力。临界点的求取方法很多,重复潮流法是应用较广且行之有效的方法之一[12-15]。

利用重复潮流计算  $S_{\max}$  的思路如下:从当前的运行点出发,选取一个合适的步长  $h$ ,按照一定的负荷增长模式(本文按相同功率因数等比例增长),不断增大负荷,每增加一次负荷就求取一次潮流解,直到有越限约束条件被激发为止。在负荷增长过程中,步长  $h$  按一定策略不断调整,直到满足一定的精度要求。即将发生越限的那个临界点所对应的负荷作为备用电源侧在当前运行方式下所能提供的最大功率。

在求解过程中,步长  $h$  的选择对在线计算的速度有很大影响,如果步长选择过大,计算精度就会降低,如果步长过小,则收敛速度又会太慢。考虑到这一原因,本文采用自动变步长的方法逐步向前增加负荷大小:若增加负荷成功(即没有约束条件触发),则以原步长继续增加负荷;若增加负荷失败(触发了约束条件),则步长减半,如此反复,直到步长减小到满足精度要求为止。图 1 为基于自动变步长重复潮流法求取  $S_{\max}$  的原理图,图中弧线与坐标轴所包围部分为地区电网可正常输送的功率示意区,当前实际负荷为  $S_0$ ,以原负荷为增长基数不断增加负荷,直到触发越限条件为止,然后缩小步长,最终收敛在边界点  $S_6$ 。

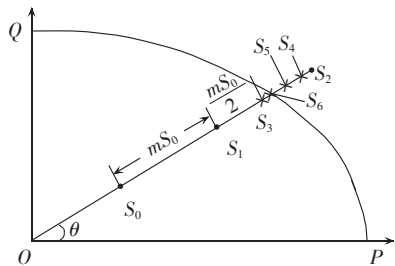


图 1 重复潮流法求取  $S_{\max}$  原理图

Fig.1 Principle of repetitive power flow method for  $S_{\max}$  calculation

图 2 为应用变步长重复潮流法求取  $S_{\max}$  的程序流程图,图中  $m_0$  为初始步长,本文选为 1。  $\varepsilon$  为收敛精度,本文取  $\varepsilon=10^{-3}$ 。

### 2 算例

算例仿真系统为河南北部某地区电网的一部分,与文献[16]中仿真系统相同,包括 3 座 220 kV

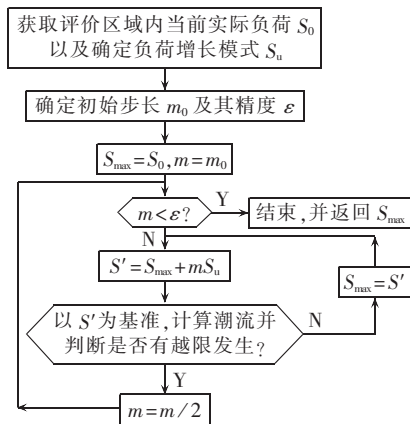


图 2 求取  $S_{\max}$  的程序流程图

Fig.2 Flowchart of  $S_{\max}$  calculation

变电站,9 座 110 kV 变电站,21 条线路,6 台三绕组变压器和 17 台双绕组变压器。3 座 220 kV 变电站之间由 220 kV 联络线相连,与该地区的其他 220 kV 变电站形成环网运行,其 110 kV 侧虽有联络线相连,但正常运行时为避免电磁环网而各自独立运行,算例仿真图[16]中未画出这 3 座变电站 110 kV 母线上的联络线。

可以看出,此部分电网为一包括 220 kV、110 kV 和 10 kV 的多电压等级的典型地区输电网络,可将其分为 3 个输电区域(不包括 220 kV 变电站),其中没有参与运行的 T 接线不属于任何区域。详细分区如表 1 所示。

表 1 各区域所含元件详细信息表  
Tab.1 Elements of different areas

| 区域  | 线路                      | 变压器                                                              | 总计            |
|-----|-------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------|
| I   | 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11 | 峨眉 1 号、峨眉 2 号、刘家庄 1 号、刘家庄 2 号、滨河 1 号、南郊 1 号、中心 1 号、中心 2 号、东风 1 号 | 11 条线路、9 台变压器 |
|     |                         |                                                                  |               |
| II  | 12、13、14、15、16          | 东风 2 号、司空 1 号、滨河 2 号、西郊 1 号、西郊 2 号                               | 5 条线路、5 台变压器  |
|     |                         |                                                                  |               |
| III | 17、18、19                | 南郊 2 号、北郊 1 号、司空 2 号                                             | 3 条线路、3 台变压器  |
|     |                         |                                                                  |               |

可见,东风站 2 台变压器上游电源分别来自杜家庵站与文峰站。假设线路 6 发生故障退出运行,则需将该线路两端断路器断开,将故障线路隔离,该线路所传输的东风 1 号变上功率可通过闭合东风站 110 kV 侧母联开关,由区域 II 中线路 12 输送。如果此时该母联开关装设了备自投装置,就需要对区域 II 中备用电源(线路 12)的可用供电能力进行实时评估,从而决定是否动作母联开关的备自投装置。

对线路 12 的  $S_{\max}$  计算的详细过程如表 2 所示。由表 2 可见,线路 12 的  $S_{\max}=40.49 \text{ MW}+77.38 \text{ Mvar}$ 。  $S_r=35.31 \text{ MW}+67.48 \text{ Mvar}$ ,原有线路 6 上所传输的功率为  $18.88 \text{ MW}+8.11 \text{ Mvar}$ ,可完全转供线路 6 所传输的功率,即不需要切除东风 2 号变所传输的功率,而只需立刻动作东风站 110 kV 母联开关上的备自

表 2 计算线路 12 的  $S_{\max}$  的详细过程  
Tab.2 Iterative calculation for  $S_{\max}$  of line 12

| 迭代次数 | 有功/MW | 无功/Mvar | 触发约束条件                   | 步长        |
|------|-------|---------|--------------------------|-----------|
| 初始值  | 5.18  | 9.90    | 无                        | 0         |
| 1    | 10.36 | 19.80   | 无                        | $S_0$     |
| 2    | 15.54 | 29.70   | 无                        | $S_0$     |
| 3    | 20.72 | 39.60   | 无                        | $S_0$     |
| 4    | 25.90 | 49.50   | 无                        | $S_0$     |
| 5    | 31.08 | 59.40   | 无                        | $S_0$     |
| 6    | 36.26 | 69.30   | 无                        | $S_0$     |
| 7    | 41.44 | 79.20   | 东风 2 号变 110 kV<br>母线电压超限 | $S_0$     |
| 8    | 38.85 | 74.25   | 无                        | $S_0/2$   |
| 9    | 41.44 | 79.20   | 东风 2 号变 110 kV<br>母线电压超限 | $S_0/2$   |
| 10   | 40.15 | 76.73   | 无                        | $S_0/4$   |
| 11   | 41.44 | 79.20   | 东风 2 号变 110 kV<br>母线电压超限 | $S_0/4$   |
| 12   | 40.79 | 77.96   | 东风 2 号变 110 kV<br>母线电压超限 | $S_0/8$   |
| 13   | 41.12 | 78.58   | 东风 2 号变 110 kV<br>母线电压超限 | $S_0/16$  |
| 14   | 40.31 | 77.03   | 无                        | $S_0/32$  |
| 15   | 40.47 | 77.34   | 东风 2 号变 110 kV<br>母线电压超限 | $S_0/32$  |
| 16   | 40.63 | 77.65   | 东风 2 号变 110 kV<br>母线电压超限 | $S_0/32$  |
| 17   | 40.55 | 77.50   | 东风 2 号变 110 kV<br>母线电压超限 | $S_0/64$  |
| 18   | 40.51 | 77.42   | 东风 2 号变 110 kV<br>母线电压超限 | $S_0/128$ |
| 19   | 40.49 | 77.38   | 无                        | $S_0/256$ |
| 20   | 40.51 | 77.42   | 东风 2 号变 110 kV<br>母线电压超限 | $S_0/256$ |
| 21   | 40.50 | 77.40   | 东风 2 号变 110 kV<br>母线电压超限 | $S_0/512$ |

投装置即可恢复全部负荷的供电,否则就要适当切除部分负荷后再动作相应备自投装置。

计算过程共迭代了 21 次,直到步长精度小于  $\varepsilon=10^{-3}$  为止。由表 2 还可以看出,初始步长的选取对迭代次数有很大影响。由于备用电源侧的可用供电能力不会超过实际负荷很多倍,因此初始步长选择  $S_0$  时,迭代不会超过 5 次就会有超限条件被触发。算法整个迭代过程中潮流计算的次数一般在 20 次以内,计算量不是很大,非常适合在线应用。

3 结语

以往在投入备自投装置时,由于没有充分考虑备用电源侧元件热稳定极限的影响或其他相关母线电压超限的情况,常常导致连锁故障发生,使故障进一步扩大。本文应用重复潮流法,实时在线评估备用电源侧的可用供电能力,将所得结果作为备自投装置动作与否的有力判据。最后利用某地区在线 SCADA 数据对上述方法进行了验证,结果表明了该方法的可行性。

参考文献:

[1] 黄梅. 电力系统自动装置[M]. 北京:中国电力出版社,3-5.

[2] 管霖,冯焱,刘莎,等. 大规模配电网可靠性指标的近似估测算法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):92-98.  
GUAN Lin,FENG Yao,LIU Sha,et al. Approximate evaluation algorithm for reliability indices of cosmically distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(10):92-98.

[3] 唐梅芳,刘忠勇,潘泳瑜,等. 220 kV 备用电源自动投入装置应用[J]. 电力自动化设备,2006,26(11):114-116.  
TANG Meifang,LIU Zhongyong,PAN Yongyu,et al. Principle and application of 220 kV automatic bus transfer equipment[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(11):114-116.

[4] 张国平,陈晖,吕庭钦,等. 倒送电运行方式中备自投动作分析及技术措施[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(8):93-95.  
ZHANG Guoping,CHEN Hui,LÜ Tingqin,et al. Analysis and technical measures of reserved auto-switch-on device action in inverse power transmission operation[J]. Power System Protection and Control,2009,37(8):93-95.

[5] 黄常抒,胡云花. 备自投装置接线中的问题及应对措施[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):147-149.  
HUANG Changshu,HU Yunhua. Wiring errors of automatic bus changeover and countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):147-149.

[6] 陈生银,宋会平,王燕,等. 220 kV 主变压器备自投的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(7):91-94.  
CHEN Shengyin,SONG Huiping,WANG Yan,et al. Study and application on automatic bus transfer equipment of 220 kV transformer[J]. Power System Protection and Control,2009,37(7):91-94.

[7] 王攀峰,魏燕,刘立功,等. 一种面向对象的备自投装置设计方案的研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(18):109-111.  
WANG Panfeng,WEI Yan,LIU Ligong,et al. Research on object oriented scheme of autoswitch-on device[J]. Power System Protection and Control,2009,37(18):109-111.

[8] 陈琼. 数字式备自投装置在水电厂的应用[J]. 电力自动化设备,2007,27(2):124-127.  
CHEN Qiong. Application of digital automatic bus transfer equipment in hydraulic power plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(2):124-127.

[9] 唐海军,杨承卫,姚翔,等. 电网备用电源自动投入的实践与思考[J]. 电力自动化设备,2005,25(5):100-101.  
TANG Haijun,YANG Chengwei,YAO Xiang,et al. Practice and thought of automatic bus transfer in power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(5):100-101.

[10] 冯玲. 如何防止备自投动作后造成过负荷[J]. 电气时代,2006(11):106-107.  
FENG Ling. How to avoid over loading by BATS action[J]. Electric Age,2006(11):106-107.

[11] 邱健,蔡泽祥,李爱民,等. 基于  $N-1$  准则的备自投投退控制策略[J]. 电网技术,2009,33(8):66-71.  
QIU Jian,CAI Zexiang,LI Aimin,et al. Analysis on control strategy of busbar automatic transfer switch based on  $N-1$  criterion[J]. Power System Technology,2009,33(8):66-71.

[12] GRAVENER M H,NWANKPA C. Available transfer capability and first order sensitivity[J]. IEEE Trans on Power Systems,1999,14(2):512-518.

[13] OU Yan,SINGH C. Assessment of available transfer capability and margins[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2002,17(2):467-468.

[14] HAMOUND G. Assessment of available transfer capability and margins[J]. IEEE Trans on Power Systems,2002,17(2):463-466.

[15] 刘皓明,倪以信,吴军基,等. 计算电网可用输电能力的方法评述[J]. 继电器,2003,31(10):45-50.  
LIU Haoming,NI Yixin,WU Junji,et al. Review of available transfer capability calculation in electricity market[J]. Relay,2003,31(10):45-50.

- [16] 刘若溪,张建华,苏玲,等. 地区电网备自投在线投退控制策略(一)备自投投退组合在线动态选择新方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):1-5,11.
- LIU Ruoxi,ZHANG Jianhua,SU Ling,et al. Online control strategy of busbar automatic transfer switch for regional power grids(1):online dynamic selection of switching combination[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(3):1-5,11.

(编辑:李育燕)

#### 作者简介:

刘若溪(1982-),男,内蒙古兴安盟人,博士研究生,研究方向为电力系统分析与控制、电力系统安全和可靠性分析(E-mail:Liuruoxi0121123@163.com);

张建华(1952-),男,北京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统安全和可靠性分析、电力应急管理。

## Online control strategy of busbar automatic transfer switch for regional power grids(2):control strategy considering available supply capability of standby power

LIU Ruoxi<sup>1</sup>,ZHANG Jianhua<sup>1</sup>,LI Gengyu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education,North China Electric Power University,Beijing 102206,China;

2. Beijing Metro Operation Company,Beijing 100082,China)

**Abstract:** Cascading failures may occur if the influence of the component thermal stability limits at standby power supply side and the voltage limits of relevant bus is not carefully considered during BATS(Busbar Automatic Transfer Switch) operation. A real-time mathematical model for online assessing the available supply capability of standby power is established with the consideration of network structure,operating mode and load level. The repetitive power flow method is used to solve it and the obtained results are used to decide if the BATSs should act. The repetitive power flow method is introduced with flowchart,which is validated with the online regional SCADA data. Result truly indicates the available supply capability of standby power and the iterative time of power flow computation is generally less than 20,suitable for online application.

**Key words:** regional power grid; busbar automatic transfer; repetitive power flow; available supply capability; control strategy