

# 地区弱电磁环网合环潮流探讨

夏翔, 周昱甬, 邱伟成

(杭州市电力局, 浙江 杭州 310009)

摘要: 浙江 220 kV 电网分区运行之后, 各供电路径上阻抗与潮流的不同导致 110 kV 及以下电网合环开关两侧存在较大的相角差, 合环潮流有可能引起设备过载甚至开关跳闸。目前杭州电网不同分区间合环操作普遍采用“先断后通”方式, 操作过程中需短时停电, 降低了供电连续性。根据地区电网环网规划, 辐射运行的特点, 经过分析计算给出了合环潮流经验公式, 该公式通过系统等值阻抗建立起合环潮流与相角差之间的联系。据此原理设定的同期闭锁装置可以确保合环过程不致设备超载。该方法已在现场运用, 效果良好, 合环操作不再短时停电, 并且对地区电网不同分区间的合环操作和降低地区电网合环潮流都有较强的指导意义。

关键词: 合环潮流; 等值阻抗; 同期闭锁

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2004)23-0028-04

## 0 引言

随着 500 kV 电网网架结构加强以及大型机组不断接入, 220 kV 变电设备出现短路电流超标现象。浙江电网从 2002 年夏季开始实施 220 kV 电网分区运行。隶属于不同分区的变电站合环操作时, 由于不同路径的阻抗和潮流分布各不相同, 且差异较大, 在合环开关两端存在较大的相角差, 环流过大将引起设备过载甚至开关跳闸。因此目前合环暂采用先断后通原则进行操作, 造成用户短时停电。由于杭州地区连续性生产企业(如印染纺织企业)用电性质特殊性, 短时停电将会给其带来很大的经济损失。

合环前可通过在线 EMS 模拟, 但潮流结果依赖于 500 kV、220 kV 外网等值模型的正确性。在无法实时获取外部网络模型与量测信息的情况下, 外网模型并不可靠, 尤其在当前电网结构快速变化阶段。因此必须采取实时功角测量闭锁合环等措施保障系统安全。

图 1 为 2003 年杭州市萧山区电网接线示意。瓶窑、乔司两个 500 kV 变电站向 220 kV 瓜沥、萧电、闻堰变电站供电, 即 220 kV 瓶窑、乔司分区。500 kV 兰亭变电站向 220 kV 合兴、宁围、萧绍变电站供电, 即 220 kV 兰亭分区。两个分区之间通过 2 条 500 kV 线路联络, 连接两个分区的 220 kV 线路解环运行。萧山区域内许多 110 kV 变电站的电源往来自不同的 220 kV 分区, 如 110 kV 通惠变电源分别来自 220 kV 闻堰和 220 kV 宁围变。

随着浙江电网结构日趋紧密, 电网分层分区运行将是大势所趋。如何正确地进行合环操作, 确保连续

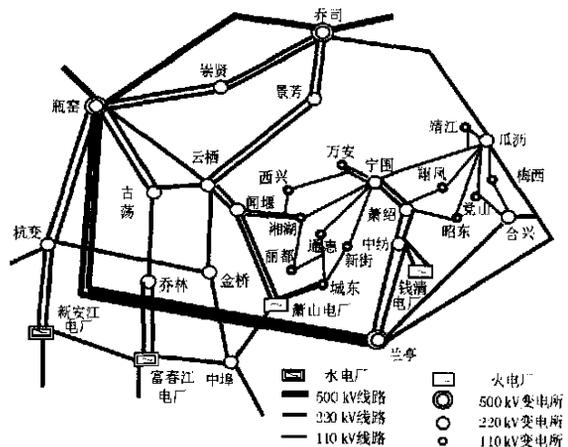


图 1 杭州萧山部分电网接线示意

Fig. 1 Connection of Xiaoshan power grid in Hangzhou

供电, 已成为杭州电网迫切需要解决的问题。

## 1 合环潮流分析

化简后的地区电网合环等值电路如图 2 所示。在合环之前, 节点  $i$  与  $j$  之间开路等价于并联一无穷大等值阻抗, 合环时, 节点  $i$  与  $j$  之间并联一个小阻抗  $Z_{kk}^{[1]}$ 。如果合环开关为设备(线路、变压器)开关, 则  $Z_{kk}$  为该设备阻抗。如果经母联等零支路合环, 则  $Z_{kk}$  为零。

根据叠加定理, 合环后的支路潮流由两部分叠加而成, 一部分是合环之前的各支路的初始潮流, 另一部分是由合环开关两端电压矢量差  $U_{ij}$  引起的均衡潮流  $S$  在网络中的分布。特别地, 由于合环前开关支路  $ij$  的潮流为零, 因此合环后流经支路  $ij$  的潮流即为纯粹的均衡潮流  $S$ 。

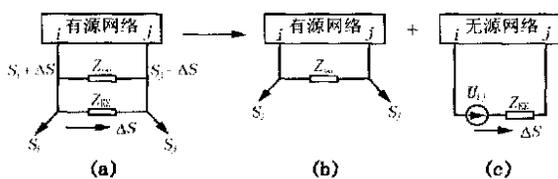


图2 叠加原理应用于合环分析

Fig. 2 Utilizing superposition principle in power flow analysis of interconnection

假定  $ij$  端口等效的戴维南等值阻抗为  $Z_{XT}$ , 则系统总的等值阻抗为  $Z_{XT} + Z_{KK}$ , 地区电网中, 由于  $R \ll X$ , 忽略电阻后, 等值阻抗为  $X = X_{XT} + X_{KK}$ . 均衡潮流  $S = P + jQ$  为:

$$P = \frac{U_i U_j}{X} \sin \theta_{ij} \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_i \cos \theta_{ij} - U_j}{X} U_j \quad (2)$$

均衡有功潮流与合环前开关两侧电压幅值的乘积成正比, 与合环前开关两侧的相角差的正弦值成正比。均衡有功潮流从功角超前的母线流向功角滞后的母线。无功均衡潮流的方向根据  $U_i \cos \theta_{ij}$  与  $U_j$  大小确定。实际中电压幅值差和功角差分别在 5% 和 15° 以内<sup>[4]</sup>, 因此  $\cos \theta_{ij} \approx 1$ ,  $R \sin \theta_{ij} \approx 0$ ,  $X \sin \theta_{ij} \approx X \theta_{ij}$ , 并有:

$$\frac{P}{Q} = \frac{U_i}{U_i - U_j} \theta_{ij} \quad (3)$$

根据式(3)推算, 有功潮流与无功潮流的比值约在 4~6 倍之间, 均衡潮流  $S$  与  $P$  基本接近。因此要控制合环潮流, 主要控制有功部分的大小。要降低有功均衡潮流, 有 3 种方法: 采取主变分列运行等措施增加系统等值阻抗, 这种手段最为有效;

改变系统运行方式, 减小开关两侧功角差。这种手段涉及大范围有功潮流转移, 实际操作非常困难;

同时降低合环开关两侧电压幅值, 如果两侧电压幅值相差较大, 根据式(1), 应以电压幅值小的母线电压为基准, 调整两母线电压幅值接近。

计算图 2(c) 中均衡潮流  $S$  在网络中的分布, 同样是一个潮流求解的问题。地区电网的特点是辐射状运行, 可做简化处理。并入  $i$  和  $j$  节点电源支路只有一个, 其他支路则都处理为负荷, 因此不在图 2(c) 中等效为阻抗支路。根据基尔霍夫定律, 图 2(c) 中, 流经接在  $i$  和  $j$  节点电源支路的潮流就是  $S$ , 差别只是潮流的方向不同。因此合环操作后系统潮流变化最大的是接在  $i$  和  $j$  节点的电源支路, 只要保证这两条支路的合环前潮流在叠加  $S$

之后不超出支路限额, 即可保证合环过程中系统是安全的。省网或区域电网(华东)在  $i$  和  $j$  节点的电源支路一般会超过一个, 因此不适用上述分析, 无法直接确定合环支路限额, 必须根据支路阻抗求解均衡潮流在网络中的分布。

以图 3 杭州局 110 kV 通惠变 110 kV 母分开关合环为例, 正常方式下, 宁通 1030 线、城通 1178 线分列送 1#、2# 主变。如果设定流经 110 kV 母分开关的潮流为  $S$ , 那么宁通 1030 线和城通 1178 线合环后的潮流将是合环前潮流加上或者减去  $S$ 。如果能够保证其中的最大值不超出设备限额, 则全系统其他设备均不会超载。

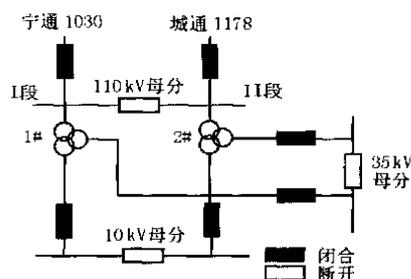


图3 杭州 110 kV 通惠变主接线图

Fig. 3 Main connection of 110 kV Tonghui substation

## 2 等值阻抗计算

推算开关两侧的戴维南等值电抗有 2 种方法: 一是采用离线潮流回推法, 即根据式(1), 利用 BPA 等离线计算软件通过合环后潮流和合环前的电压回推得到; 二是采用网络化简法, 即直接根据电网结构, 通过  $\pi$ -Y 变换推导出开关两侧的戴维南等值阻抗。为简化分析, 本文没有针对具体的 110 kV 变电站计算, 而是在两个 220 kV 变电站的 110 kV 母线搭接一虚拟零支路计算等值阻抗。

表1 离线潮流回推法与网络化简法  
计算结果比较(单位: )

Tab. 1 Calculating equivalent system impedance with two different methods

	闻堰 - 宁国	萧电 - 宁国	合兴 - 瓜沥	宁国 - 瓜沥	萧绍 - 瓜沥
离线潮流回推法	12.69	20.47	22.35	22.31	28.48
网络化简法	12.77	19.25	22.45	22.19	28.67

表中数据表明, 等值阻抗得出的结果基本一致, 均可以应用于工程实践, 相比较而言, 如果具备潮流计算程序, 方法一更加容易得到结果。

## 3 同期功角闭锁与过流保护

### 3.1 同期功角闭锁装置

根据设备和保护限额最大均衡潮流  $P_{\max}$ , 并取  $U_i$ 、 $U_j$  为额定电压, 得到合环前开关两侧最大允许功角差。

$$\alpha_{\max} = \frac{P_{\max} X}{U_i U_j} = \frac{\sqrt{3} U_B I_{\max} X}{U_i U_j} \quad (4)$$

以 110 kV 通惠变 110 kV 母分开关合环为例, 取宁通 1030 线和城通 1178 线最大允许电流不超出流变变比的 10%, 设为  $I_{\text{line-max}}$ 。考虑最严重的情况, 两台主变均满载, 主变电流设为  $I_{\text{Trans-max}}$ 。因此流经 110 kV 母分开关的最大均衡潮流  $I_{\text{Swi-max}}$  为:

$$I_{\text{Swi-max}} = I_{\text{Line-max}} - I_{\text{Trans-max}} \quad (5)$$

根据计算, 110 kV 通惠变的 110 kV 功角闭锁量为  $10^\circ$ , 35 kV 和 10 kV 母分为  $12^\circ$ 。

### 3.2 过流保护

新增的 110 kV 母分过流保护的目的是在 110 kV 合环时, 如果由于上级网络发生变化造成任一进线开关潮流超过设备限额, 即迅速跳开 110 kV 母分开关, 强行解开弱电磁环网。110 kV 母分过流保护的时间定值以躲过合环暂态过程, 同时不超出电源侧 III 段时限为原则。现场试验表明, 合环暂态过程持续 0.3 s, 电源侧 III 段时限一般为 2.6 s, 因此该套过流保护时间定值可选取 1 s。过流定值参照式(5)设定。

## 4 现场合环试验

利用同期闭锁装置, 杭州电力局还进行了现场合环试验, 数据列于表 2, 计算得到的有功潮流与实际值基本相当。由于计算等值阻抗过程中忽略了电阻, 因此计算值较实测值更大一些, 这也代表设定功角闭锁量更为保守。

表 2 杭州 110 kV 通惠变现场合环试验数据对比

Tab. 2 Contrast of calculating flow and practical flow of 110 kV Tonghui substation

潮流数据	电压 1/ kV	电压 2/ kV	相角差/ (°)	合环潮流 (实测值)	合环有功潮流 (计算值)
110 kV 母分	111.8	112.7	354.7	30.97-j4.47	34.58
35 kV 母分	36.2	34.89	352.3	12.85-j1.36	14.74
10 kV 母分	10.12	10.58	353.1	8.69+j2.03	8.93

合环时, 合环处的功角差突变为零, 连接于环网内的节点如有发电机, 其电势角度也要发生相应变化, 因其转子有惯性, 电势角(即转子角度)不能发生突变, 要经过摇摆过程才能达到新的稳态值<sup>[5]</sup>。

图 4 为浙江省中试所运用 Odyssey 录波设备录取的现场合环暂态波形。试验前宁通 1030 线和城通 1178 线分列送 1#、2# 主变, 两线电源来自于不同的 220 kV 分区, 其中通惠变 35 kV 段并有一台 12 MW 的发电机组, 试验方式是 110 kV 母分开关合环。在开关合环后的第一个周波内, 两线电流达到暂态过程的最大值。宁通 1030 线最大值是 245 A, 有效值为 129 A, 城通 1178 线最大值 366 A, 有效值是 222 A。经过 0.3 s, 电流衰减至最小, 有效值分别为 30 A 和 132 A。后又开始增加, 经过数次摇摆, 1.2 s 之后, 两线的电流达到稳态, 电流有效值分别是 62 A 和 140 A。合环瞬间的暂态值是稳态值的 1.5 倍左右。整个暂态过程电流值远远小于保护限额, 不会造成保护误动。

## 5 结语

本文将合环潮流解耦分析, 抓住地区电网辐射运行和等值阻抗中电抗分量占优的特点, 给出有功与无功均衡潮流的经验公式, 提出应主要控制合环有功潮流, 并且提出了如何根据设备限额求解功角

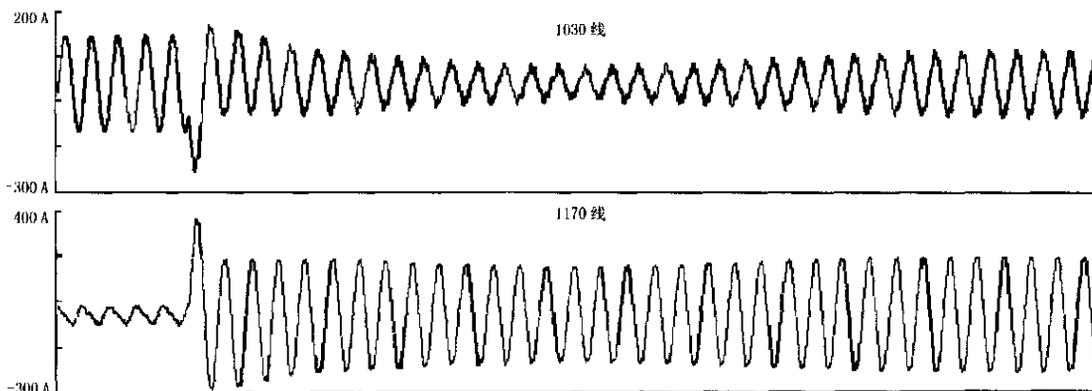


图 4 110 kV 通惠变合环试验录波图

Fig. 4 Record waveform of 110 kV Tonghui substation s closing interconnection experimentation

闭锁值的方法,现场试验验证了分析结果的正确性。据此选用的同期闭锁装置和过流保护已在杭州电网 110 kV 通惠变现场投入运行,合环操作无需停电,提高了供电可靠性。而且本文的推论也为地区电网调度人员降低合环潮流提供了理论指导。

#### 参考文献:

- [1] 张伯明,陈寿孙 (ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun). 高等电力网络分析 (Advanced Power System Network Analysis) [M]. 北京:清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1996.
- [2] Burnett R O, Butts M M, et al. Synchronized Phasor Measurement of a Power System Event [J]. IEEE Trans on PWRs, 1994, 9(3): 1643-1649.
- [3] 卢志刚,赫玉山,等 (LU Zhi-gang, HE Yu-shan, et al). 电力系统实时相角监控系统研究 (Research of Phase Angle Monitoring Control System in Power System) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1997, 21

(9): 17-19.

- [4] 陈珩 (CHEN Heng). 电力系统稳态分析 (Steady State Analysis of Electrical Power System) [M]. 北京:水利电力出版社 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1985.
- [5] 东北电业管理局调度通信中心 (Northeast Electric Power Bureau Dispatching Center). 电力系统运行操作和计算 (Operation and Calculation of Power System) [M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社 (Shenyang: Liaoning Science and Technology Press), 1996.

收稿日期: 2004-03-24; 修回日期: 2004-05-13

#### 作者简介:

夏翔 (1974 - ), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力调度及运行工作; xia-xiang @hz.zpepc.com.cn

周昱甬 (1970 - ), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力调度与运行管理工作;

邱伟成 (1960 - ), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力调度与运行管理工作。

### Power flow analysis of closing interconnection switches for weakly meshed networks in regional grid

XIA Xiang, ZHOU Yu-yong, QIU Wei-cheng

(Hangzhou Electric Power Bureau, Hangzhou 310009, China)

**Abstract:** Since the 220 kV power grid of Zhejiang Province gets zonalized, the different impedance and power flow on the 110 kV distribution line cause problems. That the large phase angle difference across the sectionizer, which connect two different 220 kV zones, leads to large loop current when the sectionizer is switch on. The equipment overload and even the switch trip may occur. Currently the method of "opening breaker before connection" is applied for such kind of operation in Hangzhou grid. A short time outage is required in the process, which decreases the supply continuity. In this paper, the formula of sectionizer current is concluded from power flow analysis by establishing equivalent system impedance based on the radiant characteristic of regional grid. In addition, sychronized lock equipment is suggested to avoid overload. This equipment demonstrates good performance of 110 kV network connection without short time outage incurring. Further application could be developed for larger zone connection and loop current reduction.

**Key words:** sectionizer current; equivalent system impedance; sychronized lock equipment

(上接第 14 页 continued from page 14)

### Load properties on-line recognition and parameter estimation based on deadbeat control inverter

LUO Guang-fu, WANG Jiar-ze, JI Yan-chao

(Department of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The deadbeat control is based on precise mathematics model of the object. The disadvantage of this control method is that the parameters of the controller depend on the parameters of the control object. When the parameters of the object change, it demands the parameters of the controller changing, or it will cause a large control error. This paper presents a new method for load properties online recognition and parameters estimation according to the characteristic of the deadbeat control inverter. This method solves the problem that the controller parameters do not match with the control object parameters which exists in the traditional deadbeat control inverter. The validity and feasibility of this proposed method is verified by simulations.

**Key words:** deadbeat control; load properties recognition; parameter estimation