基于移相调压技术的紧凑型配电网合环系统研制

徐洪海[1]，刘文松[1]，潘　明[2]，皇甫晨晨[1]，李自清[2]

（1. 江苏宏源电气有限责任公司，江苏 南京 21103；2. 上海置信电气有限公司，上海 200335）

摘要：负荷转供是配电网操作及线路检修的重要内容，当合环点两侧存在较大压差、相位差时，线路检修和倒负荷只能采取先停电后转供方式，导致供电可靠性降低。为此提出基于移相调压技术的紧凑型配电网合环系统方案，开展了合环线路暂态、稳态理论研究和仿真分析，计算合环点两侧稳态电流及冲击电流。针对目前其他技术方案存在的问题，创新性提出在合环点桥接具备自动调压和调相功能的移相调压器技术方案，制定自动控制以及保护配置策略，开发移相调压器、合环总控装置等关键设备，实现系统试点投运。

关键词：配电网；合环；冲击电流；线路相位差

Development of compact closed loop system in power distribution network based on phase-shift voltage regulation technology

XU Honghai[1], LIU Wensong[1], PAN Ming[2], HUANGFU Chenchen[1], LI Ziqing[2]

(1. Jiangsu Hongyuan Electric Co. Ltd., Nanjing 211103, China;
2. Shanghai Zhixin Electric Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: Load transfer is an important content of distribution network operation and line maintenance. When there is a large voltage and phase difference on both sides of the loop-closing point, line maintenance and load transfer can only take the way of power outage first and then transfer , resulting in the reduction of power supply reliability. Therefore, a closed-loop system scheme of compact distribution network based on phase-shift and voltage regulation technology is proposed, carries out transient and steady-state theory and simulation analysis of the closed-loop line, and calculates steady-state current and impulse current on both sides of the closed-loop point. Aiming at the problems existing in the technical proposal, it has innovative automatic adjustable and phase modulation function of phase shifting technology solutions, formulate automatic control and protection, Develop key equipment such as phase- shift voltage regulator and loop-closing control device, realize the pilot operation of distribution network closed loop system.

Key words: distribution network; loop closing; impulse current; line phase difference

0　引言

负荷转供通常包括“先合后分”的热倒模式和“先分后合”的冷倒模式，通过热倒模式可实现负荷的不停电转供。部分联络合环点受不同供电分区潮流、容性负荷和感性负荷影响以及上

级主变压器存在接线方式不同等原因，合环点两侧存在压差、相位差，在线路检修和倒负荷时，只能采取冷倒模式，导致供电可靠性降低。优化配电环网运行模式，特别是在线路检修和转移负荷时实现合环热倒，成为提升配电网供电可靠性的重要研究课题[1-2]。

本文从系统本质安全出发，立足项目难点、创新技术路线，针对配电网“合环热倒”需求，提出了基于柔性移相调压技术的紧凑型配电网合环系统方案，制定了相位、压差柔性调节和合环操作自动控制策略，研发了移相调压器、智能合环控制装置及配电网全景安防系统，实现配电网线路不停电灵活安全转供，有效解决了配电网线路“冷倒”问题，对提高配电网供电可靠性具有里程碑式重要意义。

1　问题提出

由于配电网不同线路采用常开联络开关进行连接，当部分联络合环点存在较大的压差及相位差时，直接合环后不但产生环流，合环瞬间还会出现较大冲击电流，可能引起保护动作，影响电网安全稳定运行，甚至造成用电设备损坏，给用户带来经济损失。因而现有调度规程规定，针对上述合环点倒负荷操作必须采用冷倒方式[3]。

电力电子技术与移相器是实现不停电合环的主要选择，但电力电子技术的柔性合环装置占地面积大、工程造价高及运行维护困难，目前难以在配电网中广泛应用；而传统移相器相位、压差调节不灵活，无法适应电网运行方式和线路负荷的变化。针对这一痛点问题和需求，本文对配电网线路存在相位差等原因进行了分析，开展配电网线路合环仿真工作，开发了紧凑型配电网合环系统及关键设备，可预制式地面箱式安装或者电线杆架空安装，实现合环热倒，系统灵活可控、经济实用，具有现实而广泛的推广价值。

2　系统理论及仿真分析

2.1　合环冲击电流计算模型

在合环操作时，应确保合环网络内潮流变化不超过电网稳定、设备容量等方面的限制，保证电网安全性。

图1为配电网合环系统简化模型，正常运行时联络开关断开，网络保持辐射状，当设备检修或倒负荷时合上联络开关。由于电力系统三相对称，所以只研究其中一相，合环暂态冲击的单相等效电路如图2所示[4-5]。

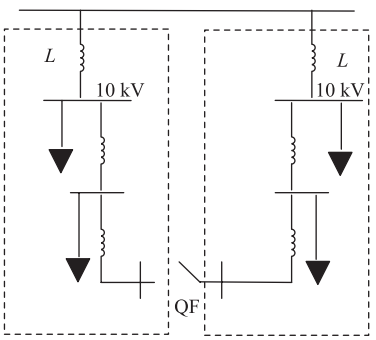


图1　配电网环路图

Fig. 1 Distribution network loop diagram

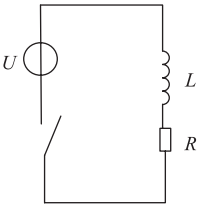


图2　简化后的计算模型

Fig. 2 Simplified calculation model

图2中，L和R为环网中所有电气元件的电感和电阻之和，合环点两侧的电压差等效为计算模型中的电压源。系统合环线路外其他部分用等效负荷处理，由于等效负荷和线路阻抗比很大，故在计算冲击电流时可忽略不计。

由于线路呈感性，合环至稳态的整个过程是振荡衰减的，因此建立微分方程计算冲击电流，即

$$L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+Ri=U_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+a) \tag{1}$$

式中，α为合环时刻电压的初始相角，它是由该时刻合环点两侧电压的相角差所决定的。

2.2　合环稳态电流及冲击电流计算

对合环后暂态过程进行分析[5-6]，合环全电流计算公式为

$$i=I_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+a-\varphi)-I_{\mathrm{m}}\sin(a-\varphi)\mathrm{e}^{-\frac{t}{T_a}} \tag{2}$$

式中，I_m为稳态合环电流幅值；ω为稳态电流和电源电压间的相角$\left(\operatorname{arctg}\dfrac{\omega L}{R}\right)$；$T_a=\dfrac{L}{R}$为衰减时间常数；$L$、$R$分别为合环点等效电感及电阻值。

当$a-\varphi=-\dfrac{\pi}{2}$时，合环电流最大瞬时值将在

合环后约半个周期出现，从而可得冲击电流最大瞬时值和最大有效值分别为

$$i_{\mathrm{M}}=\left(1+\mathrm{e}^{-\frac{0.01}{T_{\mathrm{a}}}}\right)I_{\mathrm{m}} \tag{3}$$

$$I_{\mathrm{M}}=\frac{I_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}}\left(1+2\mathrm{e}^{-\frac{0.02}{T_{\mathrm{a}}}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

取冲击系数$K_{\mathrm{M}}=1+\mathrm{e}^{-\frac{0.01}{T_{\mathrm{a}}}}$，考虑到计算误差的存在引入补偿系数，则冲击电流最大瞬时值和最大有效值可分别表示为

$$i_{\mathrm{M}}=K_{\mathrm{S}}K_{\mathrm{M}}I_{\mathrm{m}} \tag{5}$$

$$I_{\mathrm{M}}=\frac{I_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}}\left[1+2(K_{\mathrm{S}}K_{\mathrm{M}}-1)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

式中，K_S可取1～1.05，以避免冲击电流值出现负误差。

2.3 衰减时间常数T_{a}的计算

衰减时间常数T_{a}的常见计算方法有极限频率法、二支路法、等效阻抗法及最佳频率法等。其中，极限频率法和等效阻抗法只适用于各支路X/R相差不大的网络；二支路法适用于短路计算中T_{a}的求取；最佳频率法对于X/R相差很大的支路，计算非周期分量及冲击电流值准确度较高，也是文献[6]推荐的几种方法中运用范围最广的。因此，本文采用最佳频率法计算衰减时间常数T_{a}。

最佳频率法是针对某一合环后时刻取一个特定的频率（最佳频率），将网络中所有元件的阻抗（额定频率）转换为这个特定频率下的阻抗，通过网络化简求得在最佳频率下合环点的等效阻抗为

$$Z_{\mathrm{eq}}(f_{\mathrm{c}})=R_{\mathrm{eq}}(f_{\mathrm{c}})+\mathrm{j}X_{\mathrm{eq}}(f_{\mathrm{c}}) \tag{7}$$

那么合环点的衰减时间常数为

$$T_{\mathrm{a}}=\frac{f_n}{f_{\mathrm{c}}}\times\frac{X_{\mathrm{eq}}(f_{\mathrm{c}})}{\omega_{\mathrm{c}}R_{\mathrm{eq}}(f_{\mathrm{c}})} \tag{8}$$

式中，$\omega_{\mathrm{c}}=2\pi f_{\mathrm{c}}$。

最佳频率的选取与时间t有关，对额定频率为50 Hz的电网，t=0.01 s时，最佳频率f_{c}通常取20 Hz。

本文计算合环冲击电流的准确与否关键在于冲击系数K_M或T_{a}，文献[6]的误差分析表明，只要$0.005\leqslant R/X\leqslant 5.0$，冲击系数$K_{\mathrm{M}}$的偏差不会超过±5%。由于实际电网各个元件一般均满足$0.005\leqslant R/X\leqslant 5.0$的范围，因此这种方法求非周期分量及冲击电流值准确度是很高的。

因此，在配电网线路参数确定后，衰减时间常数T_{a}以及稳态电流和电源电压间的相角φ全部已知，冲击电流的取值与两侧电压差、相位差有关。

2.4 系统仿真

针对某地区南山线、滨花线两条试点线路进行仿真，两条线路对应的主变压器规格如下：额定容量50 MV·A，额定电压110 kV/10 kV，连接类型YNd11；两条线路型号：YJV22-8.7/15-3×400，长度分别为27.551 6 km、18.120 7 km。

初始情况：左侧A线路（南山线）电压10 kV，相角25°，右侧B线路（滨花线）10.5 kV，相角35°。当相角、电压经移相调压器调整后，相角差2°，电压差130 V，闭合联络开关，合环点冲击电流如图3所示。

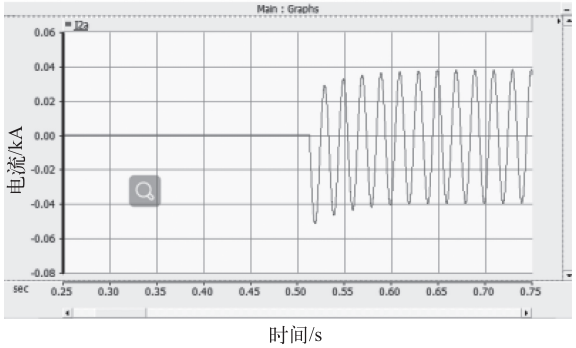


图 3 合闸处电流波形（联络开关闭合）

Fig. 3 Current waveform at closing position (The interconnection switch is closed)

此时，B线路开关断开，B线路负荷由A线路转供，A线路电流波形如图4所示，电流由原电流幅值约70 A增加到200 A。

综上，在进行合环操作时，由于线路两侧存在电压差和相位差，因此当闭合联络开关瞬

间，会产生一个较大冲击电流，稳定后线路会产生环流。而由仿真结果可知，在相位差允许范围内，配电网合环系统可以有效地降低合环点稳态电流及冲击电流，保证冲击电流不会引起保护误动作。

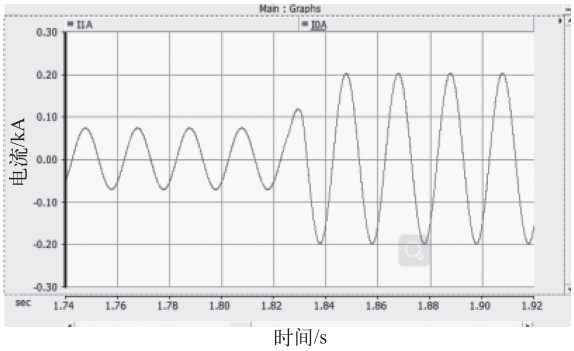


图 4　A 线路电流波形图 (联络开关断开)

Fig. 4 A line current waveform diagram

（The interconnection switch is off）

3　配电网合环系统方案

3.1　系统架构设计

为有效解决配电网线路合环冷倒，以及现有技术方案成本较高、占地面积较大等痛点问题，提出在合环点桥接具备自动调压和调相功能的移相调压器，结合智能控制技术，使合环点两侧相位差、电压差控制在允许合环范围内，实现低成本、高可靠的配电网线路不停电合环转供、潮流调节以及容量互济。

3.2　系统方案

紧凑型配电网合环系统包括移相调压器、智能合环控制装置、FTU馈线自动化终端及配电网全景安防系统等，通过相位、压差柔性调节和合环操作自动控制策略，实现配电网线路不停电灵活安全转供。系统容量5 000 kV·A，合环点电压差调节范围15%线路额定值，相位差调节范围30°，解环负荷转供能力达280 A。电气原理图如图5所示。

（1）电气一次部分

其中移相调压器、断路器和隔离开关等高压部分构成合环主回路，移相调压器负责送端和受端电源间的电压和相位调整，断路器和隔离开关负责移相调压器两端通断，电压互感器用于将高电压按比例变换为可测量低电压信号，电流互感器用于将大电流变换为可测量小电流信号，避雷器用于防止雷击过电压。

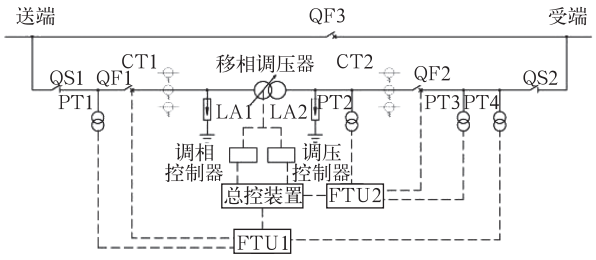


图 5　紧凑型配电网合环系统架构图

Fig.5 Architecture diagram of compact distribution network ring closing system

QF1—柱上断路器　QF2—柱上断路器　QF3—联络开关

QS1—隔离开关　QS2—隔离开关

（2）控制部分

移动式合环系统总控装置是本系统的中枢控制部分，内嵌移相调压策略。与馈线终端、调压调相控制系统通过RS 485通信，通过馈线终端采集两侧线路电压、电流和相位等遥测信息，以及断路器开合状态等内容。总控装置根据检测到的相位差和压差，通过控制调压调相控制系统调整相位和电压，直至满足合环条件，发送合闸指令，实现线路合环运行。

总控装置具备公专网4G/5G功能，可将配电网合环系统运行状态以及合环点两侧电压、相位信息上送到配电网合环监控后台系统或配电网调度，实现配电网合环点SCADA监控，配电网调度远程进行配电网合环操作，实时控制、灵活调整，毫秒内可满足负荷转移条件。

（3）保护部分

移相调压器两侧馈线终端配置三段过电流保护，定值须小于两侧主干线路、分支线路的保护定值，在出现合闸励磁涌流、冲击电流过大或短路故障时，馈线终端启动保护功能；移相调压器自身配备本体非电量保护，当移相调压器出现温度、压力或瓦斯事件时，自动断开两侧开关，避免因合环操作对两侧线路正常运行产生影响。

为防止移相调压器空载接入电网时产生较大励磁涌流，系统采用相控方式，在相电压相位90°时进行合闸投入移相调压器，可有效降低励磁涌流，避免线路保护误动作，同时也避免对两侧线路保护定值的调整，使现场操作简单可靠。

3.3 系统功能

配电网合环系统结构紧凑，可装设在杆塔上，占地面积约6 m^2，主要包括遥信遥测采集、调压调相、同期检测、全景可视化和录波功能等基本功能，可多种方式通信，具备多层次二次回路保护、远程维护以及安全防护功能。

3.4 合解环控制策略

系统具备手动和自动控制方式，操作流程如图6所示。合环判断条件为：合环点两侧角差不小于2°，压差不大于130。

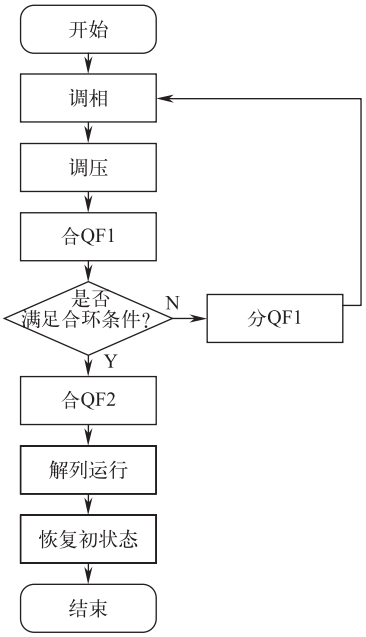


图 6 配电网合环系统操作流程图

Fig. 6 Operation flow chart of distribution network ring closing system

4 关键设备研制

4.1 移相调压器研制

移相调压器是利用电磁感应原理实现交流电压幅值和相位的变换，通过改变一次绕组的联结关系（D，Y）和单个或多个二次绕组的联结关系（D，Y，Z），来改变二次绕组的电压幅值或相位。

本系统中移相调压器二次绕组采用Z接的方式来改变电压相位，一次线圈安装调压开关，二次线圈安装调相开关，通过调节分接档位可以实现0～30°调相，3.75°一级调档，以及±3×2.5%调压，调相和调压互不影响。

移相调压器的接线方式如图7所示。将三相绕组（A、B、C）分别绕制在三相铁心柱上，绕制时将A相绕组的一部分线圈绕制在B相铁心柱上，B相绕组的一部分线圈绕制在C相铁心柱上，C相绕组的一部分线圈绕制在A相铁心柱上，从而使A、B、C三相产生的感应电动势矢量均由两部分合成，矢量图如图8所示，其中，A_1O为未调相时A相的电压幅值，A_2O为调相后A相电压幅值，两者幅值相等，但偏转了$\angle\theta$，即A_1O与A_2O夹角为$\angle\theta$。A_2X表示线圈n_3的电压幅值，OX表示线圈n_1的电压幅值，A_1X表示线圈n_2的电压幅值，YO为A_2O在A_1O上的投影，$\angle\alpha$为A_2X与A_1X的夹角，系数K为电压幅值与线圈匝数的比值。

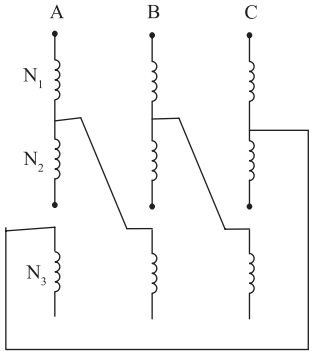


图 7 移相调压器接线图

Fig. 7 Wiring diagram of phase-shift voltage regulator

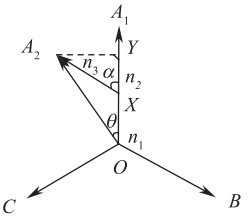


图 8 移相调压器矢量图

Fig. 8 Vector diagram of phase-shift voltage regulator

$$\sin\theta=\frac{A_2Y}{A_2O} \tag{9}$$

$$\sin\alpha=\frac{A_2Y}{A_2X} \tag{10}$$

$$A_1O=A_2O=K(n_1+n_2) \tag{11}$$

$$A_2X=Kn_3 \tag{12}$$

令$n_1=n_3$，则$\angle\alpha=2\angle\theta$，代入等式得

$$\cos\theta=\frac{n_1+n_2}{2n_3}=\frac{n_1+n_2}{2n_1} \tag{13}$$

因此，通过改变每相绕组三个线圈（N_1、N_2和N_3）间的匝数比，可实现相位角θ的调整。

4.2 总控装置研制

总控装置是本系统的中枢控制部分，内嵌移相调压策略。总控装置获取两条线路电压的相位、幅值和电流，判断两条线路电压的相位差和幅值差后，通过预设的移相调压策略控制移相调压器调整至合适档位，使合环点两侧电压的相位差、幅值差保证在允许合环的范围内，从而实现配电网线路不停电合环转供。

5 现场应用

目前，紧凑型配电网合环系统已于2022年3月成功投运，将由滨江变电站供电的10 kV滨花线上的负荷，转移至陆郎变电站供电的10 kV南山线上。采用杆上安装的方式，联络开关及与其配套的FTU、隔离开关等单独安装在一根水泥杆上，移相调压器安装在两根水泥杆之间的水泥台上，与移相调压器配套的FTU、隔离开关和避雷器等设备安装在移相调压器两侧的水泥杆上，合环控制装置安装在移相调压器下方水泥台侧面。

6 结束语

紧凑型配电网柔性合环系统解决了线路“合环冷倒”问题，实现了真正意义上的热倒。系统可应用于10 kV与10 kV，以及10 kV与20 kV配电网线路合环，通过配电网线路柔性互联，降低线路投资，实现配电网线路间容量互济、经济运行，共享配电网线路剩余容量资源，提高线路利用率，同时具备对合环馈线的潮流控制能力，实现功率在配电网线路上的灵活双向可控，改善线路轻载运行不经济的问题，降低配电网运行损耗，实现良好经济和社会效益，具有现实而广泛的推广价值。

参考文献

[1] 张建国．10 kV 配电网合环操作分析[J]．农村电气化，2016(11)：26-27．

[2] 肖辉耀，高可夫 ．10 kV 配电网合环的分析与应用 [J]．电气应用，2015，34(11)：18-23．

[3] 杨君．合环倒电技术在10 kV 配电网中的应用[J]．低碳世界，2015(36)：66-67．

[4] 袁小燕．基于选择支路交换法的张掖城区配电网电磁合环计算分析及其配电网合环操作方案的研究[J]．甘肃省电机工程学会2011年度获奖优秀学术论文集，2011(9)：55-62．

[5] 李光琦．电力系统暂态分析[M]．北京：中国电力出版社，2007．

[6] IEC 60909 Short-circuit current calculation in three-phases AC systems[S]．

[7] 杨杰，邵建雄．工程短路电流计算方法简析[J]．人民长江，2000(增刊)：66-68．

作者简介

徐洪海（1977—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为电力系统自动化、一二次融合技术等。

（收稿日期：2022-10-12）