

新型电源快速切换方法的研究与实现

秦雷鸣 曹 祯 高迪军 缪秋滚

(西门子电力自动化有限公司, 南京 211100)

摘要 快切装置支持不同的切换方法: 快速切换, 同相捕捉切换, 残压切换等。快速切换在理论上是最优的切换方法。快速切换的切换速度越快, 负荷断电时间越短, 切换时对备用电源和电动机负荷造成的电流冲击和扭矩冲击越小。但在实际应用时, 快速切换的定值难以整定, 容易错过快速切换的时机。本文基于对母线残压特性和切换过程中冲击响应的研究和分析, 提出了一种新型的基于残压特性预测的实时快速切换的方法, 并且分析了实时快速切换的优缺点。

关键词: 快速切换; 母线残压特性; 冲击响应; 实时快速切换

The Research and Implementation of a New Fast Bus Transfer Mode

Qin Leiming Cao Zhen Gao Dijun Miao Qiugun

(Siemens Power Automation Ltd., NanJing 211100)

Abstract The fast bus transfer has different transfer models: fast transfer, in-phase transfer, residual voltage transfer etc. The fast transfer mode is preferred mostly because in theory it keeps the power interruption on the motor bus to a minimum, and this transfer operation ensures that motors and the loads are not subjected to excessive or accumulated stresses. But the fast transfer mode can not completely fulfill these requirements in practice. Based on the research and analysis of residual voltage and impact response, this paper introduces a new fast transfer mode, real-time fast transfer, which is implemented by forecasting the residual voltage characteristic. This paper also analyzes the advantages and disadvantages of real-time fast transfer mode.

Key words: fast transfer; busbar residual voltage; impact response; real-time fast transfer

电源快速切换装置(简称快切装置)主要用于电厂用电和工业企业的辅助电源系统, 实现工作电源和备用电源的快速切换, 以保证系统供电的连续性。

随应用的不同, 系统接线各不相同。图1是热电厂的典型接线方式。正常情况下, 断路器1在合位, 断路器2在分位, 工作电源通过辅助变压器向电动机母线供电。如果发电机停机或系统故障导致工作电源失电, 则快切装置快速动作将电动机母线切换到备用电源。

快切装置支持不同的切换方法: 快速切换, 同相捕捉切换, 残压切换等。快速切换在理论上是最优的切换方法。快速切换的切换速度最快, 电动机断电时间最短, 切换时对备用电源和电动机造成的电流冲击和扭矩冲击最小。

快速切换的定值整定依赖于母线残压的衰减特性。残压衰减特性取决于系统配置, 包括电动机的容量、电动机的类型、电动机负载的特性等。在实际应用时, 很难获得实际的残压衰减特性, 而且

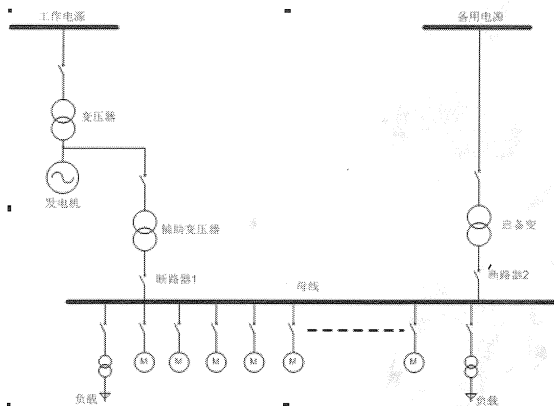


图1 热电厂典型接线

系统配置发生变化时, 残压衰减特性也会改变, 这都导致快速切换的定值难以整定。不合适的定值得电源切换时往往错过快速切换的时机。

为了提高快速切换的成功率, 本文提出一种新的实时快速切换的方法。实时快速切换在电源切换过程中实时计算残压的衰减特性, 自动计算最佳合闸时间, 从而避免了用户整定快速切换定值的问题^[1]。

本文将基于对切换过程中母线残压特性以及合闸时刻冲击响应的分析,介绍国内常用的快速切换算法,并且提出一种新的实时快速切换算法。

1 母线残压衰减特性分析

以图 1 所示系统模型为例,当电动机母线的工作电源断电后,母线上的电动机会倒送电,在母线上感应出电压。这个感生的电压被称作残压(Residual Voltage)。残压的幅值和频率随时间不断衰减。衰减的趋势和速度取决于母线上电动机群的整体特性。在电动机群中,带较大惯性负载的大容量电动机将会作为发电机向小容量电动机供电。电动机群的残压衰减曲线介于单一大容量电动机和单一小容量电动机的残压衰减曲线之间。

下文以单一电动机为例分析正常情况下断开工作电源断路器时残压衰减特性。

1.1 残压初始幅值、初始相角和初始频率

图 2 是简化的异步电动机等效电路。

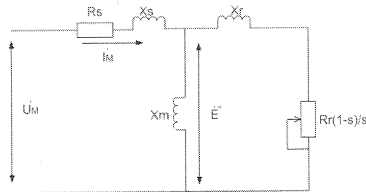


图 2 异步电动机等效电路

根据等效电路,可以得到如下的电势平衡方程

$$\dot{E}^* = \dot{U}_M - jX^* \dot{I}_M \quad (1)$$

式中, \dot{E}^* 为电动机的感应电动势; \dot{U}_M 为电动机机端电压; \dot{I}_M 为电动机的转子电流。

电动机断电瞬间,母线电压由原来的机端电压 \dot{U}_M 变为电动机感应电压 \dot{E}^* ,显然,这是两个不同的电气量。

电动机断电瞬间,电动机的磁场不会突变,则感应电动势 \dot{E}^* 不会突变。因此残压的初始幅值和初始相角即是电动机断电前瞬间感应电动势的幅值和相角^[2]。

从方程式(1)可以看出,感应电动势的幅值小于机端电压,相位滞后于机端电压。因此,在工作电源断电的瞬间,母线电压从机端电压变为感应电动势,母线电压的幅值和相角都会跳变,跳变的大小取决于电动机的参数。图 3 给出了一个母线残压幅值和相角跳变的 Matlab 仿真结果。

对于异步电机,正常情况下定子电流的磁场和转子电流的磁场是同步的。定子电流的频率等于供电电源频率 f_1 ,转子旋转的频率为 $(1-s) \times f_1$,转子电

流频率为 $s \times f_1$, s 是转差率。

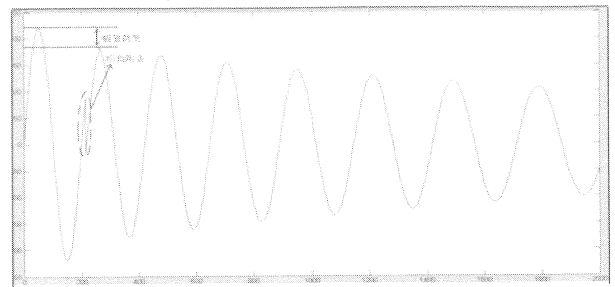


图 3 母线残压跳变的波形

工作电源断电瞬间,定子电流回路开路,定子电流为 0,转子上感应出衰减的直流电流以维持磁通量不突变,转子直流电流以指数曲线衰减。因为转子直流电流频率为 0,由转子直流电流感应出的残压频率就等于转子旋转的频率。断电瞬间,由于惯性转子转速不会跳变,因此残压的初始频率为 $(1-s) \times f_1$,断电瞬间母线电压频率从 f_1 跳变到 $(1-s) \times f_1$ 。通常情况下 s 在 0.02~0.05 之间。对于额定频率为 50Hz 的系统,工作电源断电后,母线残压的频率跳变大概在 1~2.5Hz 之间。

1.2 残压衰减时间常数

失去外部供电后,残压是转子电流感应出来的,因此残压的衰减特性和转子直流电流的衰减特性一致,按指数衰减(衰减时间常数 τ)。

图 4 描述了转子电流从电动机起动到失去供电后的变化特性。电动机起动过程中转子电流很大而且变化剧烈,电动机起动后运行在稳定状态,外部供电消失后,转子电流变为直流电流,且以指数曲线衰减(衰减时间常数 τ)。

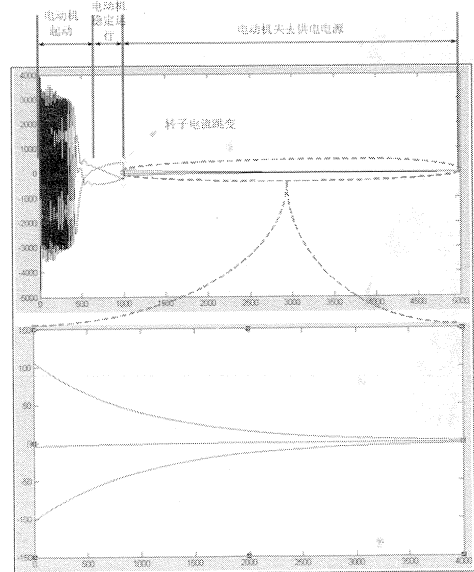


图 4 异步电动机转子电流衰减特性

图 5 描述了电动机机端线电压从电动机起动到失去供电后的变化特性。当外部供电消失后，电动机机端电压即为转子电流感应出的电压（残压），因此残压的衰减特性与转子电流衰减特性一致，以指数曲线衰减（衰减时间常数 τ ）。

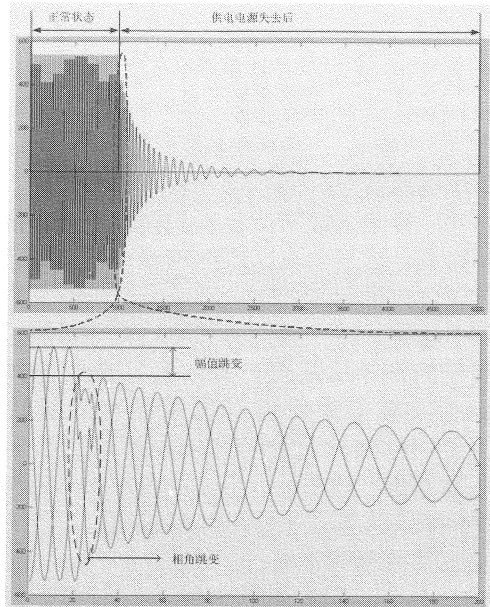


图 5 残压衰减特性

综上所述，残压衰减特性可以用下式表示：

$$U(t) = U_0 \times e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega(t) \times t + \varphi_0) \quad (2)$$

式中， U_0 为残压初始幅值； φ_0 为残压初始相角； τ 为残压衰减时间常数。

需要注意的是，当工作电源断路器因工作电源故障跳开时，随故障类型及故障持续时间的不同，母线残压的初始值及衰减特性也不相同。

2 冲击响应分析

合备用电源时，电动机会受到电流和电磁扭矩的冲击。大的冲击电流和冲击扭矩不仅会对母线上的电动机造成损害，而且会拉低母线电压，导致电动机重起动失败。因此如何尽可能降低合备用电源时的冲击电流和冲击扭矩是电源切换装置需要解决的核心问题。

为了分析备用电源合闸时，对电动机的冲击，将图 1 的电源切换系统用简化的等效电路表示，如图 6 所示。

图 6 中， Z_m 为母线上所有电动机和负载的等效阻抗； Z_s 为备用电源侧的系统阻抗； U_m 为母线残压； U_s 为备用电源电压； $\Delta U = \vec{U}_s - \vec{U}_m$ 为母线残压和备用电源电压之间的电压矢量差。

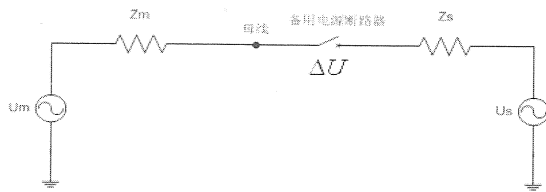


图 6 电源切换系统等效电路

2.1 冲击电流分析

工作电源断开后，在合备用电源前，备用电源断路器两侧是母线残压和备用电源电压。随着母线残压幅值和相角的变化，备用断路器两端的压差也在变化。当备用电源断路器合闸时，根据图 6 电源切换系统的等效电路，电动机冲击电流可表示为

$$I = \frac{\Delta U}{Z_m + Z_s} \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出冲击电流取决于 ΔU 和 Z_m 。

图 7 举例给出了 ΔU 的变化轨迹，最上面是母线残压和备用电源电压，其中实线代表备用电源电压，虚线代表母线残压；中间是母线残压和备用电源电压相角差变化轨迹；最下面是母线残压和备用电源电压压差变化轨迹。

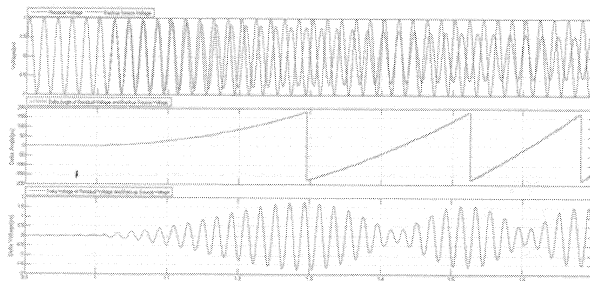


图 7 压差和相角差变化轨迹

可以看出，当相角差为 180° 时，压差达到最大。

2.2 冲击扭矩分析

图 8 和图 9 分别给出了不同相角差和不同频差下冲击扭矩的仿真结果。图 8 所示的仿真是在压差和频差都为 0 的情况下进行的，图 9 所示的仿真是在压差和相角差都为 0 的情况下进行的。

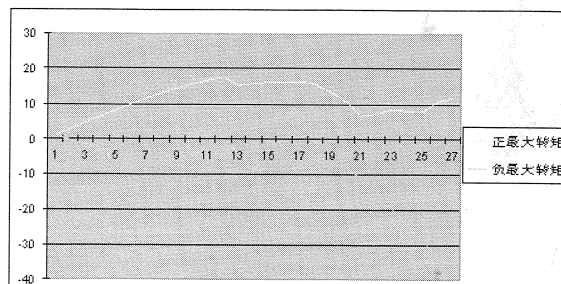


图 8 不同相角差对应的冲击扭矩

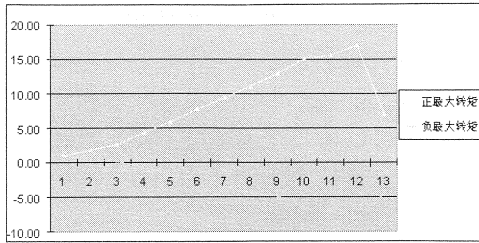


图9 不同频差对应的冲击扭矩

由以上仿真结果可以得到如下结论:

- 1) 合于备用电源时的冲击电流主要取决于母线残压和备用电源之间的相角差。
- 2) 合于备用电源时的冲击扭矩取决于母线残压和备用电源之间的相角差和频差。

3 实时快速切换的研究与实现

基于以上理论分析,快切算法需要解决的核心问题是:如何尽可能降低母线合于备用电源时的冲击电流和冲击扭矩,即如何保证母线合于备用电源时的压差、相角差和频差在允许范围内。

根据图6电源切换系统的等效电路可以得到,合于备用电源时电动机的机端电压是

$$U_m = \frac{Z_m}{Z_m + Z_s} \times \Delta U < U_p \quad (4)$$

U_m 不能超过电动机耐受电压(例如1.1倍的额定电压值),则 ΔU 的最大允许值是 $U_p / \left(\frac{Z_m}{Z_m + Z_s} \right)$ 。

即若合于备用电源时 ΔU 小于最大允许值,则电动机是安全的。

3.1 传统快切算法分析

目前国内常用的快切算法由快速切换和同相捕捉切换组成,其动作区域如图10所示。理论上快速切换可以将母线上的电力中断保持在最短的时间内并能保证电动机及其负载不会受到过度的或累积的损害,所以优选选择快速切换。如果快速切换的判据没有得到满足,失去快速切换的时机后同相捕捉切换将被启动,即同相捕捉切换是快速切换的后备。

快速切换的判据如下,

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &< \Delta\varphi_{FTparameter} \\ \Delta f &< \Delta f_{FTparameter} \end{aligned}$$

这里 $\Delta\varphi$ 为衰减的母线电压和备用电源电压之间的相角差, Δf 为衰减的母线电压和备用电源电压之间的频率差。 $\Delta\varphi_{FTparameter}$ 和 $\Delta f_{FTparameter}$ 是需要用户整定的定值。 $\Delta\varphi$ 和 Δf 为实时的测量值,而

$\Delta\varphi_{FTparameter}$ 和 $\Delta f_{FTparameter}$ 为工作电源断路器断开时的瞬时值并由用户来设定。用户要确保备用电源断路器合上时, ΔU 小于最大允许值。

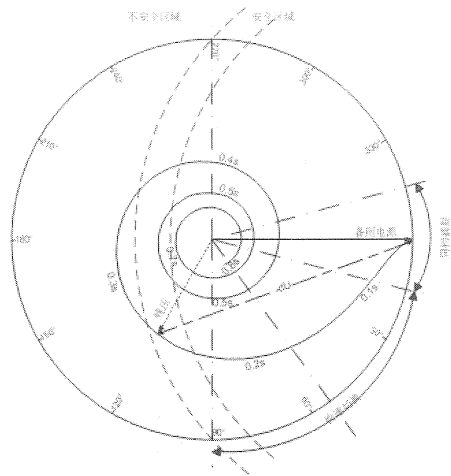


图10 传统快切动作区域

举例说明:假定某残压特性,在最初的0.2s之内,电压、频率衰减较小,频差平均为1Hz,相角差在 60° 以内 ΔU 小于最大允许值。假定备用电源断路器合闸时间为100ms。则100ms内母线与备用电源向量夹角增大 36° ,因此在发合闸命令时测得的相角差应小于 24° 。所以根据此残压衰减特性,频差定值整定为1Hz,角差定值整定为 20° 左右。

由于设定参数的前提是全面地分析残压特性,用户难以恰当地确定参数 $\Delta\varphi_{FTparameter}$ 和 $\Delta f_{FTparameter}$ 的值。同时,理论上讲,当电动机群的任何一个参数变化后,残压特性也将改变, $\Delta\varphi_{FTparameter}$ 和 $\Delta f_{FTparameter}$ 也需要相应地予以重新确定,而这是十分困难的。为此,用户通常将 $\Delta\varphi_{FTparameter}$ 和 $\Delta f_{FTparameter}$ 确定为较小的值,以免快速切换超出允许范围,结果导致快速切换不能充分发挥作用,进而丧失了重新为与母线连接的电动机供电和维持运行连续性的最佳时机,而等待同相捕捉做出反应需要数百毫秒的时间。这一延迟将延长切换时间,并增加冲击电流和冲击力矩。

当快速切换不成功时,同相捕捉切换是其后各切换方式^[3]。同相捕捉切换指的是相角差接近于零时合上备用电源开关,其判据如下,

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{forecast} &< \Delta\varphi_{IN-PHASEparameter} \\ \Delta f &< \Delta f_{IN-PHASEparameter} \end{aligned}$$

$\Delta\varphi_{forecast}$ 为预测值,指的是合于备用电源时的角差。通常预测 $\Delta\varphi_{forecast}$ 的方法是将相角差的变化轨迹近似看作二次曲线,则有:

$$\Delta\varphi_{\text{forecast}} = \Delta\varphi + (\Delta\varphi)' \times \Delta T + \frac{1}{2}(\Delta\varphi)'' \times \Delta T^2 \quad (5)$$

式中, $\Delta\varphi$ 为初始相角差; ΔT 为断路器合闸时间; $(\Delta\varphi)'$ 为相角差变化率; $(\Delta\varphi)''$ 为相角差二次变化率。

3.2 实时快速切换算法分析

为了降低快速切换定值整定的难度, 提高快速切换的成功率, 本文提出了一种新的实时快速切换方法。其动作区域示于图 11。

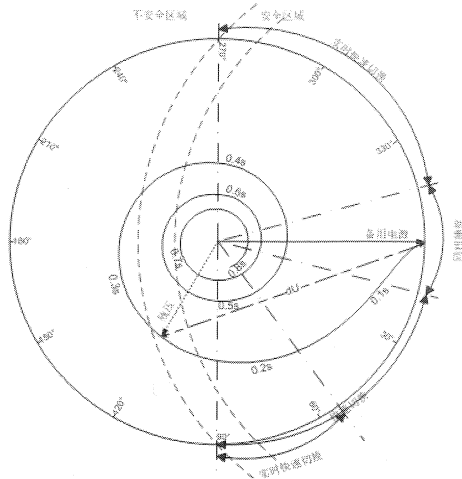


图 11 实时快速切换动作区域

对于异步电机, 只要合上备用电源时施加在电动机上的电压不超过耐受电压, 即 ΔU 小于最大允许值, 异步电机就是安全的。实时快速切换实时计算母线残压衰减特性以及母线残压和备用电源相角差的变化特性预测到合于备用电源时母线残压与备用电源电压矢量差。如果预测的 ΔU 小于最大允许值, 则可以起动实时快切合备用电源。

实时快速切换的核心是如何快速而且准确地预测出断路器合上时刻的母线残压与备用电源电压矢量差 $\Delta U_{\text{forecast}}$ 。如图 12 所示, $\Delta U_{\text{forecast}}$ 可通过余弦定理计算得到:

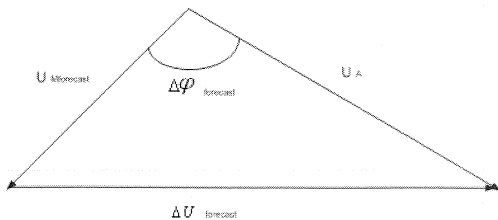


图 12 $\Delta U_{\text{forecast}}$ 矢量图

$$\Delta U_{\text{forecast}} = \sqrt{U_{\text{Mforecast}}^2 + U_A^2 - 2 \times U_{\text{Mforecast}} \times U_A \times \cos \Delta\varphi_{\text{forecast}}} \quad (6)$$

式中, $U_{\text{Mforecast}}$ 为母线残压的预测值; U_A 为备用电

源电压; $\Delta\varphi_{\text{forecast}}$ 为相角差的预测值。

在电源切换的过程中, 默认备用电源电压是稳定的, 因此 U_A 是当前时刻由傅里叶变换求得的实时值, $\Delta\varphi_{\text{forecast}}$ 可以由 3.1 中的式 (5) 求得。因此如何计算 $U_{\text{Mforecast}}$ 是最关键的。由 1.2 中的式 (2) 可知, 母线残压的幅值为

$$U = U_0 \times e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

假设母线残压在 t_1 时刻的幅值为 U_1 , t_2 时刻的幅值为 U_2 , 则有

$$U_1 = U_0 e^{-\frac{t_0 - t_1}{\tau}} \quad (8)$$

$$U_2 = U_0 e^{-\frac{t_0 - t_2}{\tau}} \quad (9)$$

由式 (8) 和式 (9) 可得

$$\frac{U_1}{U_2} = e^{-\frac{t_2 - t_1}{\tau}} \quad (10)$$

根据泰勒公式, 式 (10) 可以变换为

$$\frac{U_1}{U_2} = 1 + \frac{t_2 - t_1}{\tau} + \frac{(t_2 - t_1)^2}{2 \times \tau^2} \quad (11)$$

令 $\lambda = -\frac{1}{\tau}$, 式 (11) 可以变换为

$$\frac{(t_1 - t_2)^2}{2} \times \lambda^2 + (t_1 - t_2) \times \lambda + (1 - \frac{U_1}{U_2}) = 0$$

求解:

$$\lambda = \frac{1 - \sqrt{2 \times \frac{U_1}{U_2} - 1}}{t_2 - t_1} \quad (12)$$

由式 (12) 求出残压衰减时间常数 τ 之后, 便可带入式 (7) 求得 $U_{\text{Mforecast}}$, 其中 t 为备用电源断路器合闸时间, 由用户整定。求出 $U_{\text{Mforecast}}$ 后, 便可连同 U_A , $\Delta\varphi_{\text{forecast}}$ 一起带入式 (6) 求出 $\Delta U_{\text{forecast}}$ 。

3.3 实时快速切换算法的优缺点

实时快速切换算法通过实时计算残压衰减特性, 用户不必全面了解不同情况下的残压衰减特性而只须设定备用电源断路器闭合时电压差的极限值就可方便地实现快速切换, 且无须因残压特性的改变而调整先前的设定, 从而方便了用户的操作, 克服了现有技术中存在的缺陷。

但是, 相比快速切换, 实时快速切换需要额外的时间来计算残压衰减特性。因此实时快速切换不能单独使用, 只能作为快速切换的后备。

(下转第36页)

(2) 输出单相电流 80kA、5s 的单相电压最大值不低于 55V (计算值 58.0V)。

4 结论

2006 年我院建成了一套三相试验能力达长期工作电流 10kA 和短时 80kA、5s 的大电流试验电流源, 用该电流源曾进行成套开关设备三相 10kA 的长期发热和 6300A 断路器的 12 倍额定电流脱扣等多试验, 能满足试验要求。该电流源也可作为其他大容量电工产品的发热、热稳定性等多项试验的电流源。在整套系统的设计中, 第一大特点是输电线路、调压装备等多环节均采用了拆大为小, 用小部件、小设备组合替代大设备, 其体积小、布局紧凑、节能、节材, 特别是多条三芯电缆分相并联的应用, 使低压大容量较长距离送电得以实现, 有推广应用价值; 第二大特点是大型设备一机多用, 提高了设备利用率, 节省了一套 3150kVA 以上等级变电站的建站资

金和占地面积。

参考文献

- [1] GB 14048.2 低压开关设备和控制设备. 低压断路器.
- [2] 李宗延. 电力电缆施工手册[M]. 中国电力出版社, 2002.
- [3] 费让若. 多磁路变压器的应用与调节系统的改进[J]. 低压电器, 1999(6).
- [4] GB/T 12706.1 额定电压 1kV 到 3.5kV 挤包绝缘电力电缆及附件第 1 部分: 额定电压 1kV 和 3.5kV 电缆.

作者简介

杨万生 (1954-), 高工, 副院长兼检测站技术负责人。

杨良瑞 (1958-), 男, 工程师, 试验室主任, 从事检测。

牛 蒙 (1962-), 女, 工程师, 从事检测。

王存龄 (1940-), 女, 正高工, 顾问。

(上接第 20 页)

4 结论

随着机组容量的增大和自动化水平的提高, 快切装置应用的越来越广泛。快切装置的应用对于保障系统的安全可靠运行发挥了重要作用。但在实际应用中, 快速切换的定值难以整定, 往往导致快速切换不动作, 同相捕捉切换动作^[4]。

如果在快切装置中加入实时快速切换, 在快速切换失败时, 实时快速切换可以在同相捕捉切换之前动作, 从而缩短供电中断的时间, 减小对电动机和备用电源的冲击, 提高系统运行的可靠性。

参考文献

- [1] 李瑞生, 王义平, 熊章学, 姚晴林. 厂用电快速切换应用与研究[J]. 继电器, 2005, 33(10): 79-81.
- [2] 李经升, 王舜, 韩学义. 厂用电快速切换装置的应用研究[J]. 继电器, 2002, 30(7): 37-39.

[3] 刘增远, 康小宁, 郭峰. 厂用电电源切换时的相位差问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(11): 60-64.

[4] 古卫婷, 刘晓波, 古卫涛. 变电站备自投装置存在问题及改进措施[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(10): 70-71, 75.

作者简介

秦雷鸣 (1975-), 男, 项目经理, 从事继电保护装置研发和项目管理工。

曹 祯 (1982-), 男, 高级研发工程师, 从事继电保护装置研发工。

高迪军 (1975-), 男, 产品经理, 从事继电保护装置研发和产管工。

缪秋滚 (1980-), 男, 高级测试工程师, 从事继电保护装置研发测试工。