

三机组对双电源快速切换的影响

梁志珊, 夏鹏程, 卜繁多

(中国石油大学(北京)自动化系, 北京 102249)

摘要: 使用 ETAP 仿真软件对含有三机组的 6 kV 变电站, 发生进线断路器误跳故障和进线三相短路故障时的双电源快速切换过程进行分析。仿真结果表明, 进线断路器误跳故障时的工作母线残压可能上升超过系统正常电压, 相角差超过典型整定值 20° 。进线三相短路故障时的工作母线电压下降得很低以至于不满足快速切换判据, 切换时间太长。因此, 在快速切换判据中增加工作母线电压上限约束为 1.1 倍额定电压, 相角差可以整定为 $23^\circ \sim 30^\circ$ 。在进线三相短路故障时增加残压切换判据检验, 并采用同时切换方式, 缩短了切换时间。

关键词: 三机组; 母线残压; 快切装置; 改进判据; 参数整定

Influence of 3-component flue gas expander train on fast transfer of double power supply

LIANG Zhi-shan, XIA Peng-cheng, BU Fan-duo

(Automation Department, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Fast transfer processes of double power supplies are analyzed by help of ETAP simulation software, when incoming line circuit breaker false tripping fault and incoming line three-phase short-circuit fault happen in a 6 kV substation containing 3-component flue gas expander train. The simulation results show that, the residual voltage of operating bus likely rises more than normal system voltage in the incoming line circuit breaker false tripping fault event, and the phase angle difference is more than the typical 20 degrees. The operating bus voltage drops in the incoming line three-phase short-circuit fault event and is too low to meet the fast transfer criteria, and the transfer time is too long. Thus the operating bus voltage upper limit of 1.1 times rated voltage is added, and the setting values of the phase angle difference is properly 23~30 degrees. The residual pressure switch criterion inspection is added in the incoming line three-phase short-circuit fault, and works under simultaneous switching mode to shorten the transfer time.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.51071176).

Key words: 3-component flue gas expander train; busbar residual voltage; high speed transfer device; improved criterion; parameters setting

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0033-07

0 引言

近年来, 电源快速切换装置(简称快切装置)向模块化、标准化、小型化和智能化方向发展^[1], 不仅适用于发电厂厂用电系统大角切换^[2], 也在工业企业变电站低压母线成功应用^[3]。三机组是炼油厂提升经济效益和节能减排的特殊电气负荷。电网故障导致三机组供电中断对炼油厂生产造成很大影响^[4]。目前, 已采用快切装置实现三机组的连续供电。

快切装置的控制理论和方法不断完善, 但在实际应用中还存在不足。快切装置能否在最佳时机动作是由快速切换判据决定的^[5], 其中快速切换的定值是关键。快速切换的定值整定依赖于母线残压的衰减特性, 但在工业现场应用中很难获得实际各不相同的残压衰减特性, 这使得快速切换的定值难以统一整定^[6]。原则上参数整定需要实际验证。对于不同情况, 电机参数和母线残压衰减特性等关键数据必须进行实测, 试验研究工作很复杂^[7]。由于三机组大功率负载具有发电和电动工况的特殊性, 母线电压衰减与常规电机负载有所不同, 快切装置的参数整定与以往的经验整定是否一致难以确定。因此, 需要通过仿真手段验证参数整定的准确性。以

基金项目: 国家自然科学基金(51071176); 中国石油天然气股份有限公司项目(KY-11-104); 中国石油大学(北京)前瞻导向基金(2010QZ03)

前的快速切换判据忽略了工作母线电压上限。进线三相短路故障时的工作母线电压下降得很低以至于不满足快速切换判据, 故障切换时间太长。

为了克服参数整定的困难, 艾德胜提出以电流为判据避免单一参数不满足就闭锁快速切换的弊端^[8]。在快速切换判据不能满足时, 秦鸣雷等提出实时快速切换判据作为后备^[6], 郭伟等提出同期捕捉切换作为后备^[9-10], 但比快速切换的供电中断时间长。为了提高双电源快速切换成功率, 周雪松等改进了继电保护与快切装置的配合^[11]。冯小兰等改进了事故快速启动方式和引入过流方向闭锁功能, 并指出同步电动机、高压并联电容器组和发电机对电源快速切换的影响需要进一步研究^[12]。

陈延枫等对四机组建模仿真时将烟气轮机等效成同步发电机接入电网用于三相短路故障分析^[13]。这种在母线上增加同步发电机后的母线残压与实际的母线上只有电动/发电机的母线残压不一致, 不能等效双电源快速切换的暂态过程。因此, 三机组的动态模型仍然需要研究改进。

本文以某炼油厂含三机组和高压并联电容器的变电站为例, 采用分类等效思想在 ETAP 软件仿真环境下建立等效的动态模型。针对系统发生进线断路器误跳故障和进线三相短路故障, 对事故快速切换过程进行暂态稳定分析。以母联断路器和高压电机等设备的冲击电流在整定时间内小于电流保护整定值作为快切装置切换成功的标志。为快切装置参数整定和动作判据优化提供理论依据。

1 含三机组的双电源供电系统

三机组通常由电动/发电机、变速器、主风机和烟气轮机构成, 如图 1 所示。三机组运行方式分为电动工况和发电工况。在电动工况时, 电动/发电机将电网提供的电能转化为机械能供给主风机, 烟气轮机将催化裂化工艺产生的再生烟气的热能转化为机械能供给主风机。在发电工况时, 电动/发电机将烟气轮机供给主风机后剩余的机械能转化为电能送回电网。

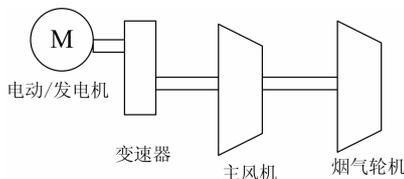


图 1 三机组示意图

Fig. 1 Diagram of 3-component flue gas expander train

基于三机组运行时的能量平衡关系, 对三机组

不同运行方式下的机电暂态过程可以采用分类建模的思想进行等效。假设在供电系统发生故障前工作母线的初始状态是某一稳态。因此, 在电动工况时, 将三机组等效成一个电动机模型, 将烟气轮机和主风机等效成该电动机的负载。而在发电工况时, 将三机组等效成一个发电机模型, 将烟气轮机和主风机等效成该发电机的原动机。

含三机组的供电系统如图 2 所示。其中的电动/发电机为异步电机, 在 ETAP 软件中三机组等效成一台异步电机 K101, 在异步发电工况时设置成发电机工作状态, 在异步电动工况时设置成电动机工作状态。异步电机 K101 的主要参数为: 额定电压 6 kV, 额定功率 6 300 kW, 定子电阻 1.280 5 p.u., 定子电抗 14.016 p.u., 转子电阻 0.8 p.u., 转子电抗 9.25 p.u., 励磁电抗 732.12 p.u., 电机惯量常数 0.59 s, 原动机和负荷惯量常数 33.85 s, 极对数 2。

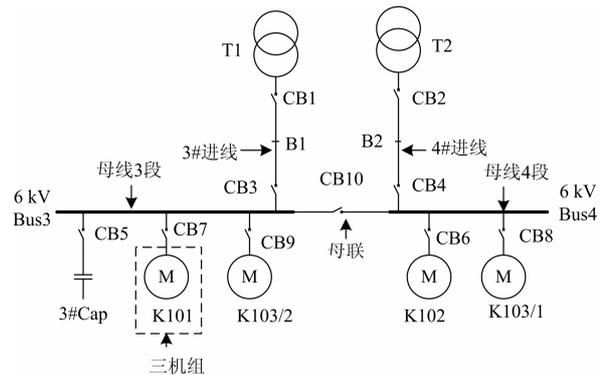


图 2 含三机组的双电源供电系统图

Fig. 2 3-component flue gas expander train of double power supply system diagram

2 进线断路器误跳故障快速切换过程

2.1 工作母线电压变化的理论分析

在发生进线断路器误跳故障时, 工作母线电压在不同阶段表达式如下^[14]。

(1) 工作母线电压初始值

正常运行时工作母线电压为

$$\begin{cases} U_r = U_{Fr} - r_{T1} \sum_{k=1}^n I_{rk} + x_{T1} \sum_{k=1}^n I_{smk} \\ U_m = U_{Fm} - r_{T1} \sum_{k=1}^n I_{smk} - x_{T1} \sum_{k=1}^n I_{srk} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{Fr} 和 U_{Fm} 为工作变压器高压侧电压的实部和虚部; r_{T1} 和 x_{T1} 为工作变压器的电阻和电抗; n 为工作母线上的电动机台数。

(2) 工作母线残压

供电系统进线断路器误跳时, 电动机惰行时工

作母线残余电压为

$$\dot{U} = U_r + jU_m = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{sri}^s + jI_{smi}^s)}{\sum_{i=1}^n Y_i} \quad (2)$$

其中,

$$Y_i = 1/(r_i + jx_i'') \quad (3)$$

$$I_i^s = I_{sri}^s + jI_{smi}^s = E'' / (r_i + jx_i'') \quad (4)$$

式中: 上角 s 表示电流源; E'' 为电动机次暂态电势; x'' 为电动机次暂态电抗。

(3) 工作母线和备用母线的共同电压在母联断路器合闸前备用电源的电压为

$$\dot{U}_0 = U_{0r} + jU_{0m} = (r_{T2} + jx_{T2}) \sum_{i=1}^m (I_{Fr} + jI_{Fm}) + \dot{U}_{start} \quad (5)$$

式中: U_{0r} 和 U_{0m} 为备用电源电压的实部和虚部;

$\sum_{i=1}^m (I_{Fr} + jI_{Fm})$ 为母联断路器合闸前备用母线供给的总负荷电流; m 为接于备用母线的电动机台数;

r_{T2} 和 x_{T2} 为备用电源变压器的电阻和电抗; \dot{U}_{start} 为备用母线电压初始值。

在母联断路器合闸后工作母线和备用母线合在一起电压相同, 电压为

$$\begin{cases} U_r = U_{0r} - r_{T2} \sum_{k=1}^{n+m} I_{srk} + x_{T2} \sum_{k=1}^{n+m} I_{smk} \\ U_m = U_{0m} - r_{T2} \sum_{k=1}^{n+m} I_{smk} - x_{T2} \sum_{k=1}^{n+m} I_{srk} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 改进的快速切换判据及动作逻辑

一般电动机启动时机端电压不能超过 1.1 倍额定电压^[15]。电机重新合上电源时, 电机电抗上的残压 ΔU_m 为

$$\Delta U_m = \Delta U \frac{X_m}{X_s + X_m} \quad (7)$$

以前的快切装置适用于工作母线电压逐渐衰减的情况, 是在工作母线电压和备用电源电压大于下限整定值、相角差和频率差小于上限整定值时合上备用电源。但是以前的判据忽略了母线电压上限, 工作母线电压可能上升并超过了 $1.1U_N$, 在这种情况下容易引起快切装置误切换, 对电动机绕组绝缘造成损坏。因此, 提出一种增加工作母线电压上限约束的快速切换判据: 当相角差、频率差和备用电源电压都满足判据条件时继续进行下列判断。

(1) 当 $U_{bus} > 1.1 U_N$ 时, 或当 $U_{set} < U_{bus} < 1.1 U_N$, $U_{bus} + dU/dt \cdot T_{close} > 1.1 U_N$ 时, 或当 $U_{bus} < U_{set}$ 时, 都不能快速切换;

(2) 当 $U_{set} < U_{bus} < 1.1 U_N$, $U_{bus} + dU/dt \cdot T_{close} < 1.1 \cdot U_N$, 可以快速切换。

式中: U_{bus} 为当前时刻的工作母线电压; U_N 为母线额定电压 (6 kV); U_{set} 为工作母线电压下限整定值

($0.7 U_N$); dU/dt 为工作母线电压变化率; T_{close} 为母联合闸回路所需总时间。

2.3 电动工况的快速切换仿真分析

在 ETAP 软件中暂态稳定分析事件设置为: 在 $t=1.000$ s 时 3#进线断路器 CB3 发生误跳故障, 在 $t=1.080$ s 时母联断路器 CB10 合闸。

设异步电动/发电机的负载率是 100%。母线 3 段 (Bus3) 有四种运行方式: (1) 电动/发电机 K101、K103/2 和 3#Cap; (2) 电动/发电机 K101、K103/2; (3) 电动/发电机 K101、3#Cap; (4) 电动/发电机 K101。

在快速切换过程中工作母线电压幅值、相角曲线、电机 K101 和母联断路器的电流曲线如图 3 所示。在图 3 中用数字 1、2、3、4 标记的曲线分别代表上述四种运行方式下的快速切换过程。

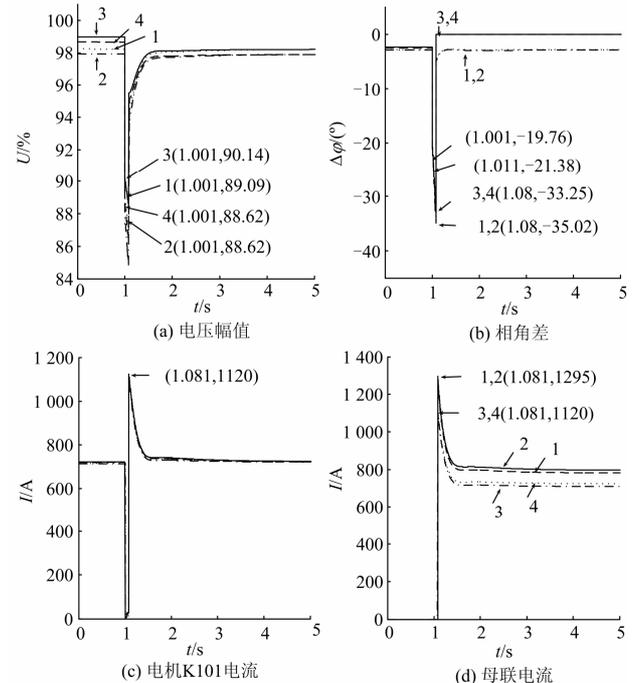


图 3 异步电动工况的快切过程

Fig. 3 Fast transfer processes of asynchronous motor conditions

由图 3 (a) 可知, 在检验快速切换判据时, 工作母线电压都大于 $0.7 U_N$, 满足判据条件。然而在图 3 (b) 中相角差在 $t=1.001$ s 时为 -19.76° , 在

$t=1.011$ s 时为 -21.38° ，以前的相角差整定值为 20° ，由相角差变化趋势可知实际整定范围应该大于 22° 才能实现快速切换。

由图 3 (c) 和图 3 (d) 可知，电机 K101 的电流峰值是 1 120 A，母联的电流峰值分别是 1295 A 和 1 120 A。当母线 4 段不带负载时，4#进线电流与母联电流基本一致。继电保护整定值如表 1 所示。继电保护分析可知快切过程中的冲击电流不会引起保护动作，说明双电源快速切换成功。

表 1 设备继电保护整定值
Table 1 Setting value of relay protection

| 设备 | 过流及延时 | 速断 |
|---------|------------------------|----------------|
| 电机 K101 | 1 000 A, 1.3 s (极端反时限) | 5 200 A |
| 母联 | 4 000 A, 1.1 s (定时限) | 8 000 A, 0.3 s |
| 4#进线 | 4 000 A, 1.4 s (定时限) | 8 000 A, 0.6 s |

2.4 发电工况的快速切换仿真

现有的并联电容器补偿容量为 324 kvar，在电机满载运行时功率因数低于 0.90，不满足三机组无功补偿原则^[16]。设母线 3 段只有电机 K101 和电容器 3#Cap 工作，按无功补偿容量可分为三种运行方式：(1) 3#Cap 为 324 kvar，功率因数 0.90；(2) 3#Cap 为 1 700 kvar，功率因数 0.99；(3) 3#Cap 为 700 kvar，功率因数 0.95。异步发电工况时的快切仿真结果如图 4 所示。

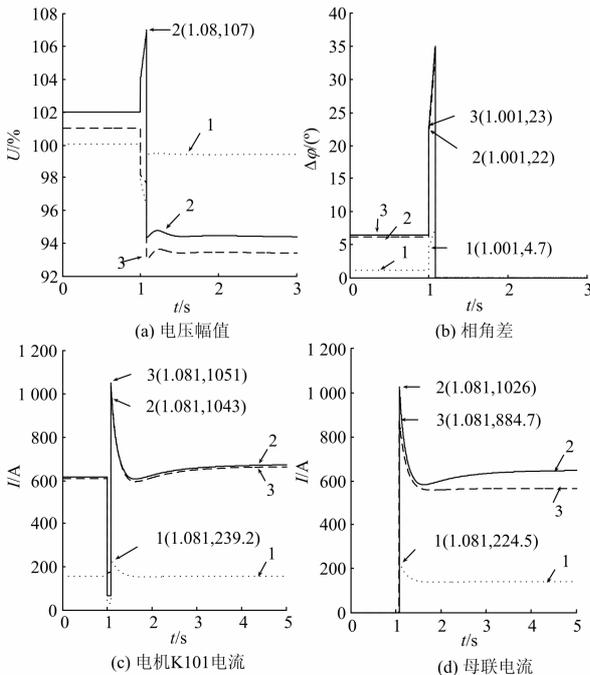


图 4 异步发电工况的快切过程

Fig. 4 Fast transfer processes of asynchronous generator conditions

由图 4 (a) 可知，在检验快速切换判据时，工作母线电压都大于 $0.7 U_N$ ，满足判据条件。但运行方式 2 时的母线电压上升，在 $t=1.08$ s 时母联断路器合闸前电压幅值达到 U_N 的 107%。在图 4 (b) 中当 $t=1.001$ s 时运行方式 1 时的相角差为 4.7° ，运行方式 2 时为 22° ，运行方式 3 时为 23° ，由相角差变化趋势可知实际整定范围应该大于 23° 才能实现快速切换。

由图 4 (c) 和图 4 (d) 可知，快切产生的冲击电流不大，在三种运行方式下电机 K101 的电流峰值分别是 239.2 A、1 043 A 和 1 051 A，母联的电流峰值分别是 224.5 A、1 026 A 和 884.7 A。继电保护分析可知快切过程中的冲击电流不会引起保护动作，说明双电源快速切换成功。

仿真结果表明：含有三机组的变电站在供电系统发生进线断路器误跳故障后，当三机组处于发电工况运行方式 2 时，会出现工作母线电压高于正常电压的情况，若工作母线电压超过系统设备的保护定值，则设备会跳闸。而现有快速切换判据中只设定工作母线电压整定值的下限，对上限并没有考虑。因此，含有三机组的变电站供电系统需要增加工作母线电压上限的约束，建议设定工作母线电压上限值为 1.1 倍额定电压。为了提高快速切换成功率，根据相角差整定计算方法^[17]，建议在含三机组的变电站中快切装置相角差整定为 $23^\circ \sim 30^\circ$ 。

3 进线三相短路故障快速切换过程

3.1 改进的残压切换判据及动作逻辑

在发生进线三相短路故障时故障段母线电压下降到很低，不满足快速切换判据的条件，现有快切装置不能实现快速切换。虽然在三相短路故障期间能够满足残压切换判据的条件，但是在此期间并不判断残压切换判据，在故障的进线断路器跳闸后判断残压切换判据，失去了快速切换的机会。因此，在满足备用电源投入时电机绕组承受的电压小于 $1.1 U_N$ 的前提下，提出一种改进的残压切换判据，其判断逻辑如下。

当发生进线三相短路故障时，若不满足快速切换判据，则检验残压切换判据条件，判断工作母线电压是否小于残压切换判据整定值。如果是，则采用同时切换方式，即同时发出进线断路器分闸命令和母联断路器合闸命令。如果否，则继续等待其他切换条件。

在企业变电站中一般安装光纤纵差保护，通过联跳故障点两端的断路器达到隔离短路故障的目的。当进线光纤纵差保护信号启动快切装置时也发

出了进线断路器跳闸命令, 即使快切装置采用同时切换方式, 由于断路器固有分闸时间小于合闸时间, 实际上仍然遵循事故串联切换的原则, 工作电源断开后才会合上备用电源。

3.2 电动工况的残压衰减和快切过程仿真分析

在 ETAP 软件中, 进线三相短路故障时的残压衰减仿真事件设置为: (1) 当 $t=1.000$ s 时 3#进线节点 B1 发生三相短路故障; (2) 当 $t=1.070$ s 时 3#进线断路器 CB1 和 CB3 跳闸; (3) 当 $t=1.560$ s 时电机 K101 的断路器 CB7 和电容器 3#Cap 的断路器 CB5 跳闸。

进线三相短路故障时的快速切换仿真事件设置为: (1) 当 $t=1.000$ s 时 3#进线节点 B1 发生三相短路故障; (2) 当 $t=1.070$ s 时 3#进线断路器 CB1 和 CB3 跳闸; (3) 当 $t=1.080$ s 时母联断路器 CB10 合闸。

设备低电压保护整定值如表 2 所示。在异步电动工况下的残压衰减仿真结果如图 5 所示。

表 2 设备低电压保护整定值
Table 2 Setting value of low voltage protection

| 设备 | 低电压整定值 (额定电压 U_N 的百分比) | 延时 |
|-----------|-----------------------------|-------|
| 电机 K101 | 60% | 0.5 s |
| 电机 K103/2 | 60% | 5 s |
| 电容器 3#Cap | 55% | 0.5 s |

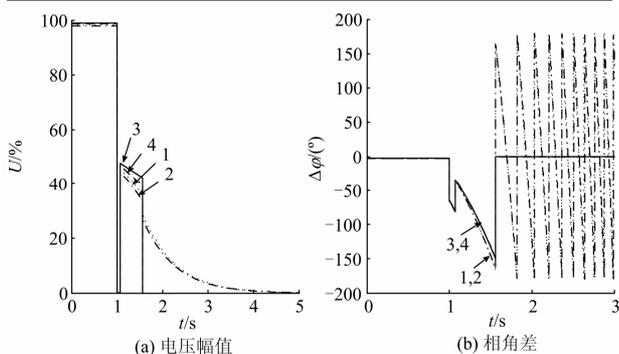


图 5 异步电动工况时的残压衰减过程

Fig. 5 Residual voltage attenuation of asynchronous motor conditions

由图 5 (a) 可知, 进线三相短路故障后瞬间母线电压下降至零, 在检验快速切换判据时不满足快速切换判据的条件。故障隔离后残压恢复到 $0.45U_N$ 左右。在图 5 (b) 中相角差在故障后也不满足判据条件。以前在故障的进线断路器跳闸后判断首次同期切换、残压切换和长延时切换等判据, 受母线残压衰减特性的影响故障切换时间较长。而高压电机 K101 低电压保护延时 0.5 s, 在备用电源投入前可能已经跳闸。

由母线残压衰减特性计算得在 $t=1.080$ s 母联断路器合闸时电机绕组承受的电压小于 $1.1U_N$, 满足备用电源投入条件。在异步电动工况运行方式 1 下采用改进的残压切换判据后的快切仿真结果如图 6 所示。母线 3 段上运行的异步电动机向短路故障点输入能量形成反馈电流, 由图 8 可知, 3#进线的反馈电流峰值是 2 394 A, 母联冲击电流峰值是 1 587 A, 电机 K101 在短路期间和快切过程中的电流峰值分别是 2 130 A 和 1 394 A。4#进线的电流与母联的电流基本一致。继电保护分析可知快切过程中的冲击电流不会引起保护动作, 说明双电源快速切换成功。

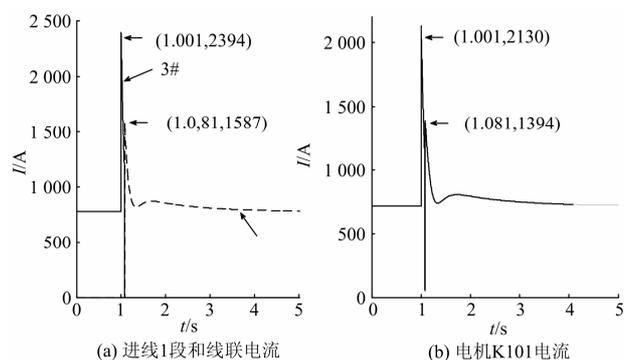


图 6 异步电动工况时的快切过程

Fig. 6 Fast transfer processes of asynchronous motor conditions

3.3 发电工况的残压衰减和快切过程仿真分析

设异步发电机的发电量为 1340 kW。异步电动工况时的残压衰减仿真结果如图 7 所示。由图 7 可知, 三相短路故障后瞬间电压下降至零, 在检验快速切换判据时不满足快速切换判据的条件。故障隔离后残压恢复到 $0.5U_N$ 左右。在图 7 (b) 中相角差在故障后也不满足判据条件。以前故障切换时间较长, 在备用电源投入前高压电机 K101 低电压保护可能已经跳闸。

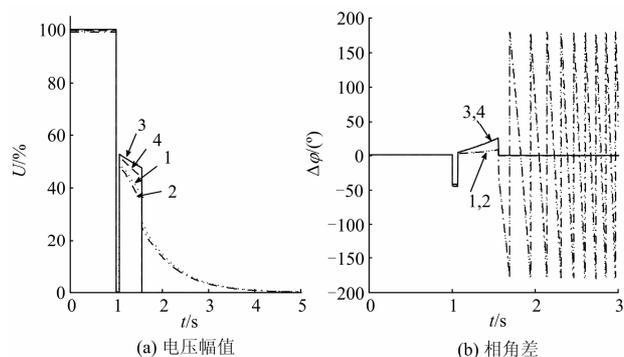


图 7 异步发电工况时的残压衰减过程

Fig. 7 Residual voltage attenuation of asynchronous generator conditions

由母线残压衰减特性计算得在 $t=1.080\text{ s}$ 母联断路器合闸时电机绕组承受的电压小于 $1.1 U_N$, 满足备用电源投入条件。在异步发电工况运行方式 1 下采用改进的残压切换判据后的快切仿真结果如图 8 所示。母线 3 段上运行的异步发电机向短路故障点输入能量形成反馈电流, 由图 8 可知, 3#进线的反馈电流峰值是 $2\ 300\text{ A}$, 母联冲击电流峰值是 $1\ 011\text{ A}$, 电机 K101 在短路期间和快切过程中的电流峰值分别是 $2\ 041\text{ A}$ 和 824.7 A 。4#进线的电流与母联的电流基本一致。继电保护分析可知快切过程中的冲击电流不会引起保护动作, 说明双电源快速切换成功。

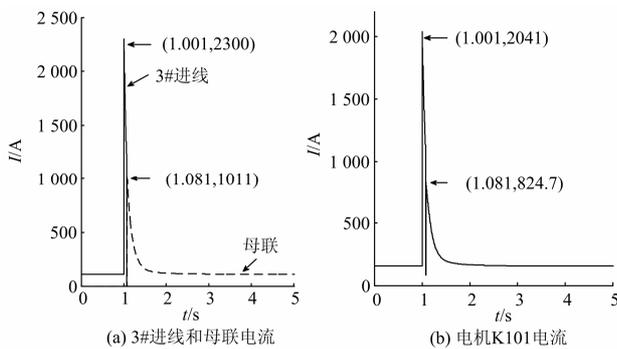


图 8 异步发电工况时的快切过程

Fig. 8 Fast transfer processes of asynchronous generator conditions

仿真结果表明: 采用改进的残压切换判据能够实现进线三相短路故障时的双电源快速切换的目的, 缩短了事故停电时间, 保证了三机组连续供电。

4 结论

通过对含有三机组的变电站仿真建模, 分析了进线断路器误跳故障和进线三相短路故障时的双电源快速切换过程, 提出了快切装置的改进措施: 在快速切换判据中增加工作母线电压上限约束为 1.1 倍额定电压, 并且相角差整定值为 $23^\circ \sim 30^\circ$ 合适; 在进线三相短路故障时不满足快速切换判据后增加检验残压切换判据, 并采用同时切换方式以达到双电源快速切换的目的。保证了三机组的安全稳定运行。本文对三机组的建模方法也适用于四机组。

参考文献

[1] 刘文亮, 唐昆明, 张太勤. 基于 MiniISA 总线的厂用电快速切换装置的研发与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 215-230.
LIU Wen-liang, TANG Kun-ming, ZHANG Tai-qin. Research and application of auxiliary power fast transfer

device based on MiniISA bus[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 215-230.
[2] 兀鹏越, 何信林, 王团结, 等. 厂用电大功角切换问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 59-62.
WU Peng-yue, HE Xin-lin, WANG Tuan-jie, et al. Discussion of power supply transfer in big power angle[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 59-62.
[3] 苗世华, 李杰, 宗洪良. 工业企业电源快速切换装置在低压母线的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 76-79.
MIAO Shi-hua, LI Jie, ZONG Hong-liang. Application of industrial enterprises power quick-switching device in the low-voltage bus[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 76-79.
[4] 王晏. 电网闪络对催化裂化烟气轮机一主风机组运行的影响及对策[J]. 炼油技术与工程, 2005, 35(6): 21-23.
WANG Yan. Influence of electrical network flashing on running of flue gas expander-main blower set in FCC unit and countermeasures[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2005, 35(6): 21-23.
[5] 李瑞生, 王义平, 熊章学, 等. 厂用电快速切换应用与研究[J]. 继电器, 2005, 33(10): 79-81.
LI Rui-sheng, WANG Yi-ping, XIONG Zhang-xue, et al. Application and research of station service fast switchover[J]. Relay, 2005, 33(10): 79-81.
[6] 秦雷鸣, 曹祯, 高迪军, 等. 新型电源快速切换方法的研究与实现[J]. 电气技术, 2012(6): 16-36.
QIN Lei-ming, CAO Zhen, GAO Di-jun, et al. The research and implementation of a new fast bus transfer mode[J]. Electrical Engineering, 2012(6): 16-36.
[7] 李经升, 王舜, 韩学义. 厂用电快切装置的应用研究[J]. 继电器, 2002, 30(7): 37-39.
LI Jing-sheng, WANG Shun, HAN Xue-yi. Application research on the auxiliary power high-speed transfer device[J]. Relay, 2002, 30(7): 37-39.
[8] 艾德胜. 以电流为判据的厂用电电源快切原理及实现[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(6): 85-88.
AI De-sheng. House supply fast transfer criterion based on impulse current and its realization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6): 85-88.
[9] 郭伟, 胡敏姜, 叶留金, 等. 厂用电切换方法的研究及应用[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(15): 26-29.
GUO Wei, HU Min-you, YE Liu-jin, et al. Study and

- application of power-supply-transfer between power plant motor buses[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(15): 26-29.
- [10] 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]. 继电器, 2007, 35(11): 60-64.
LIU Zeng-yuan, KANG Xiao-ning, GUO Feng. Discussion on phase difference when plant source switching[J]. Relay, 2007, 35(11): 60-64.
- [11] 周雪松, 崔立强, 马幼捷, 等. 高压电源快切对企业电网继电保护影响的研究[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(3): 45-53.
ZHOU Xue-song, CUI Li-qiang, MA You-jie, et al. Analysis of influence on protective relaying of enterprise's power system at power switching[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(3): 45-53.
- [12] 冯小兰, 李杰, 苗世华, 等. 新型电源快切装置在工业企业变电站的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 139-142.
FENG Xiao-lan, LI Jie, MIAO Shi-hua, et al. Application of high-speed bus transfer device in industrial substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 139-142.
- [13] 陈延枫, 解利斌, 陈广. 炼油机组的暂态稳定分析[J]. 陕西电力, 2007, 35(2): 36-40.
CHEN Yan-feng, XIE Li-bin, CHEN Guang. Transient stability analysis for oil refining unit[J]. Shaanxi Electric Power, 2007, 35(2): 36-40.
- [14] 黄纯华, 龚大德. 异步电动机群动态仿真[J]. 电工技术学报, 1990, 11(4): 13-19.
HUANG Chun-hua, GONG Da-de. Dynamic simulation of induction machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1990, 11(4): 13-19.
- [15] 西北电力设计院. 电气工程电气设计手册 1, 2[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
Northwest China Electric Power Institute. Manual of electrical engineering[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990.
- [16] 涂延红. 催化裂化装置异步电动/发电机无功补偿设计分析[J]. 硅谷, 2012(10): 63-64.
TU Yan-hong. Design and analysis of reactive power compensation for FCCU induction motor/generator[J]. Silicon Valley, 2012(10): 63-64.
- [17] 付英杰, 梁志珊, 夏鹏程. 双电源快切装置相位差整定仿真分析[J]. 电气应用, 2013, 32(7): 45-50.
FU Ying-jie, LIANG Zhi-shan, XIA Peng-cheng. Simulation analysis of phase-tuning of fast speed transfer device in double power supplies[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(7): 45-50.

收稿日期: 2013-11-12; 修回日期: 2013-12-06

作者简介:

梁志珊(1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统控制与稳定、非线性控制、电力电子技术; E-mail: lzs1960@cup.edu.cn

夏鹏程(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化;

卜繁多(1988-), 女, 硕士, 主要研究方向为双电源快速切换仿真技术。