

带发电机母线的工业企业电源切换过程研究

张翔¹, 卫志农¹, 李杰², 林霞¹, 苗世华², 宗洪良²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏南京 210098;

2. 江苏金智科技股份有限公司, 江苏南京 211100)

摘要:介绍了带发电机母线的工业企业电源切换过程的切换原理和常用合闸方式, 讨论了厂用母线加装同步发电机对电源切换的影响。仿真分析表明, 同步发电机在工业企业电源切换中能与现有快切装置相互配合, 并提高了电源切换的成功率。

关键词:工业企业; 快速切换; 同捕切换; 同步发电机

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2011)05-0013-04

因故障或误操作导致进线断路器跳闸时, 厂用电工作母线失电将对整个工厂设备的安全可靠运行产生重大影响^[1]。而备用电源切换装置是保证厂用电安全可靠运行的重要设备。当工作母线失去电源时需要通过备用电源切换装置投入备用电源, 以保证向厂用负荷正常供电。而此时失电母线的残压和频率会不断衰减^[2], 其与备用电源电压的相角、幅值产生差值, 随着残压的快速变化, 失电母线与备用电源电压的相角差逐渐拉开, 这就要求必须在快速变化中找出恰当的时刻进行合闸, 以满足合闸瞬间电动机的冲击电流最小, 减小对电动机的损害。常用切换装置需满足一定的相角差、频率差以及残压等判别条件才能成功切换。许多石油、化工等厂矿企业在厂用母线侧加装了同步发电机, 不仅提高了供电可靠性, 加强了对本地重要设备的持续供电, 而且提高了工厂备用电源切换的成功率。文中对带发电机母线的工业企业电源切换过程进行了研究。

1 切换原理简述

工业企业常见的接线如图 1 所示。正常运行时, 两段母线分列运行。当进线 1 或进线 2 发生故障时, 线路保护动作, 母线失电。此时快切装置应跳开进线开关, 合上分段开关, 由对侧进线带两段母线运行。

系统的等值电路和相量^[3]如图 2 所示。

图中 U_d 为母线残压; U_s 为备用电源电压; ΔU 为正常电源与失电母线间的电压差, 通常通过冲击电流表现出来; X_m 为失压母线上电动机组的等值电抗; X_s 为备用电源的等值电抗。从图中可以看出电压差 ΔU 与 θ 角 (U_s 和 U_d 二者间的夹角) 和残压 U_d 相关。定义 U_m 为电动机绕组承受的电压, 则有:

收稿日期: 2011-04-17; 修回日期: 2011-05-20

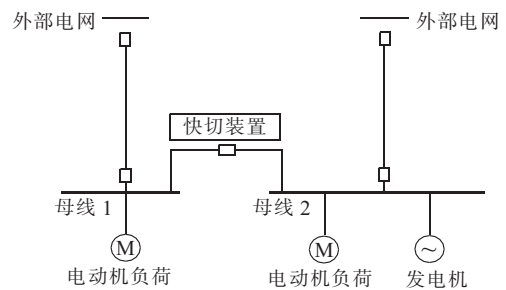


图1 典型接线

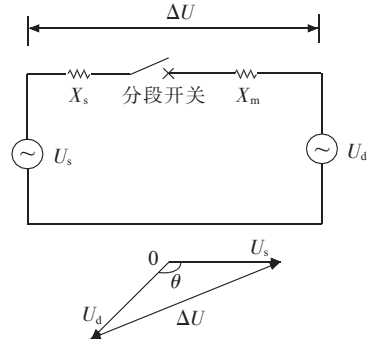


图2 残压等效电路与相量

$$U_m = \frac{X_m}{X_m + X_s} \Delta U \quad (1)$$

令

$$K = \frac{X_m}{X_m + X_s} \quad (2)$$

则

$$U_m = K \Delta U \quad (3)$$

为保证切换安全, 定义合闸时电动机所能承受的电压不大于 1.1 倍的额定电压 U_N ^[4]。因此有:

$$K \Delta U < 1.1 U_N \quad (4)$$

从而

$$\Delta U (\%) < \frac{1.1}{K} \quad (5)$$

用极坐标表示的残压相量变化轨迹如图 3 所示, 即以 A 为圆心, 以 $\frac{1.1}{K}$ 为半径作圆, A'~A" 右侧

为备用电源允许切换的安全区域,左侧则为不安全区域。

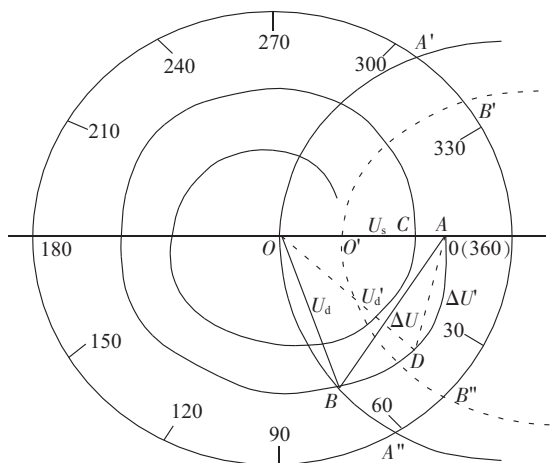


图3 残压特性相量

可见, X_m 越大, 即电动机容量较小时, K 值越大, 残压相量图中的安全区域圆面积越小, 安全稳定裕度越小, 即图3中的 $A' \sim A''$ 向右移至 $B' \sim B''$, 相应安全区域圆半径也由 AO 减小为 AO' , 因此需更加重视电动机容量较小时的安全切换问题。

2 常用合闸方式

2.1 快速合闸方式

快速合闸是指当母线电源中断时, 若此时系统满足切换条件, 立刻发出断路器的合闸指令。此时母线电压的幅值和频率下降不多, 相角差不大, 产生的冲击电流非常小, 切换成功率高, 安全性好, 对电动机启动最为有利, 因此快速合闸方式也是最被推崇的一种切换方式, 对应图3中的 $A \sim B$ 段。

为保证一定的裕度, 一般将快速合闸下备用电源电压与母线残压间相角差限制在 30° 以内, 频差限制在 1.5 Hz 内, 整个动作时间窗限制在 $100 \sim 150 \text{ ms}$ 范围。

2.2 捕同期合闸方式

捕同期合闸方式^[5]又称为同捕合闸方式。当由于一些客观原因, 例如备用电源电压和母线电压本身就存在一个较大的初相角或者开关设备自身条件所限等, 快速合闸方式失效时, 同捕合闸方式可以作为快速合闸的后备切换, 这时装置自动转入同期判别, 使得厂用电源切换能够安全进行。同期捕捉切换以相位差为 ε (一般为一接近 0° 的数值) 时作为合闸目标, 同捕区域位于图3中的线段 AO 与残压相量运动轨迹的交点 C 附近。在快速切换方式失效时, 如果能实现同捕切换对电动机自启动也是比较有利的。

2.3 残压合闸方式

当电压衰减到 $(25\% \sim 40\%)U_N$ 后, 不考虑是否满足同期条件, 只要残压低于残压定值, 就发出备用电源合闸信号而实现电源切换称为残压切换, 这种切换方式下产生的冲击电流对电动机影响较大。

3 厂用母线加装同步发电机对电源切换的影响

3.1 减小了切换瞬间电动机的冲击电流

如图1所示, 当工作线路发生故障, 保护动作跳开断路器, 将故障隔离, 若失压母线侧存在同步发电机, 由于该同步发电机为电动机提供了有功补偿, 且认为该同步发电机的频率调整特性为:

$$\Delta P = K \Delta f \quad (6)$$

其中, K 为单位调节系数, 负荷侧加装同步机后, 功率因数一定时, 同步发电机容量越大, 对电动机提供的有功补偿越多, 母线失电后有功缺额 ΔP 越小, K 为常数, 频率差 Δf 也越小, 该时间段内平均频率差 $\overline{\Delta f}$ 也相对减小, 而母线失电后相角差为:

$$\Delta \varphi = 2\pi \overline{\Delta f} \Delta t \quad (7)$$

即相同时间段内相角差 $\Delta \varphi$ 减小, 减慢了相角差拉开的速度。若假设原先母线失电时间为 Δt 时, 运行点在图3中的 B 点, 加装同步机后, 由于相角差 $\Delta \varphi$ 减小, 此时运行点在 D 点, 更靠近快切安全区域的中心, 且电压差 $\Delta U' < \Delta U$, 从而减小了切换时电动机的冲击电流。

3.2 提高了失电后的母线残压

快切装置能够成功切换对母线残压是有要求的, 无论是采用快速切换还是同捕切换方式都不能使母线残压过低。当低于 $25\% \sim 40\%$ 的额定电压时, 以上2种切换方式就会失效。尤其当母线上电动机负荷容量较小时, 失电后其维持电压的能力较弱, 残压水平较低, 快切装置的快速和同捕切换方式就很有可能失效。母线失电后, 如装设同步发电机, 功率因数一定时, 容量越大, 为母线提供的无功补偿越多, 即母线残压衰减速度减慢甚至不减; 而且一般同步发电机容量越大, 励磁系统调节能力越强, 维持残压的能力也越强。但要注意, 母线残压水平如果低于发电机低电压保护定值时, 发电机保护会动作, 将同步发电机切除。

4 算例仿真及结果分析

利用电力系统分析综合程序包(PSASP)仿真, 来验证厂用同步发电机与电动机负荷容量比不同时相关参数的差异, 以此验证同步发电机对电源切换的影响。某厂接线如图4所示。

外电网及平衡节点电源可近似认为是无穷大电

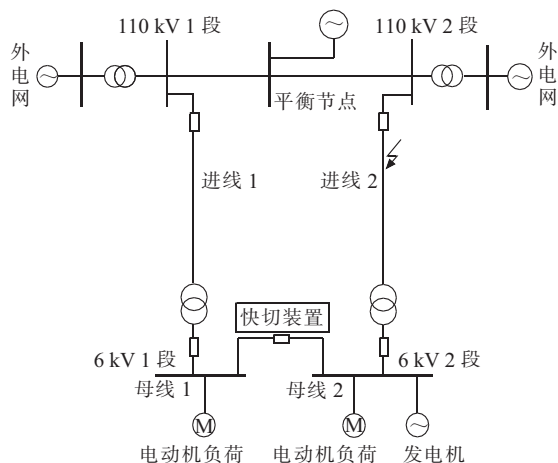


图4 PSASP 中厂用母线带发电机仿真模型

源,模型参数如下。

系统: $S_B=100$ MVA, $f=50$ Hz,高压母线电压基值 $V_{Bh}=110$ kV,低压母线电压基值 $V_{Bl}=6$ kV;

110 kV 线路: $R_1=0.032$ p.u., $X_1=0.161$ p.u., $B_{1/2}=0.153$ p.u., $L=1$ km;

6 kV 线路: $R_1=0.0085$ p.u., $X_1=0.072$ p.u., $B_{1/2}=0.0745$ p.u., $L=1$ km;

变压器数据:归算至高压侧后 $R_1=0.005$ p.u., $X_1=0.0625$ p.u.,YnD 连接;

厂用电动机:功率因数为 0.9,电动机负荷容量为 5 MVA,定子电抗 $X_1=0.295$ p.u.,转子电阻 $R_2=0.018$ p.u.,转子电抗 $X_2=0.18$ p.u.,惯性时间常数 $T_J=2$ s;

厂用同步发电机:暂态电抗 $X_d'=0.1198$ p.u.,次暂态电抗 $X_d''=0.0398$ p.u.,惯性时间常数 $T_J=6.8$ s,功率因数为 0.9。

如图 4 所示,1s 时刻线路 110 kV 2 段~6 kV 2 段发生三相短路故障,故障持续 100 ms 后保护装置将线路切除。进行快速切换仿真时,母线失电 100 ms 后(即 1.2 s 时刻)快切装置发合闸命令,母联开关动作;进行同捕切换仿真时,第一个同捕点到来时刻快切装置发合闸命令。令正常运行时母线电压为 1 p.u.,仿真结果如表 1 所示。

从表 1 仿真结果来看,随着同步机与电动机容量比的增大,可以得出以下几个结论:

(1) 快速合闸安全动作时间域变长。对比表 1 中第 3 列和第 4 列数据,失电母线相角差为 30° 及母线频率差为 1.5 Hz 的时刻逐渐后移。随着同步机与电动机容量比增大,快速合闸安全动作时间域将进一步增大,增大趋势如图 5 所示。

(2) 由表 1 中第 5 列数据可得第一个同捕点到来时刻也逐步后移。采取同捕切换方式进行切换时,第一个同捕点对应的相角差为 360° ,即第一个同捕点时刻为:

表 1 同步机与电动机容量比不同时的仿真数据

同步机与电动机容量比/%	快速切换时母线残压/p.u.	失电母线与正常母线相角差为 30° 时刻/s	母线频率差为 1.5 Hz 时刻/s	第一个同捕点时刻/s	同捕时刻母线残压值/p.u.
0	0.86	1.35	2.10	2.07	0.32
10	0.90	1.38	2.16	2.13	0.61
30	0.93	1.45	2.90	2.30	0.78
50	0.94	1.55	3.32	2.55	0.86
65	0.95	1.68	3.89	2.88	0.90
75	0.97	1.83	4.11	3.26	0.92
85	0.98	2.14	5.16	4.04	0.88
95	0.98	3.37	9.66	6.78	0.87

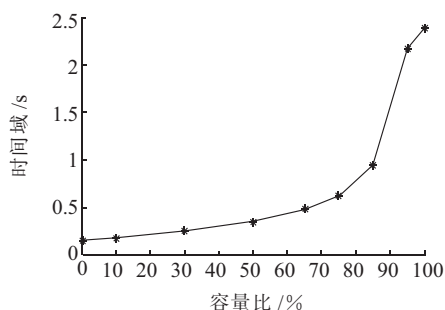


图5 快切安全动作时间域随同步机与电动机容量比变化曲线

$$\Delta t = \frac{360^\circ}{2\pi\Delta f} \quad (8)$$

上式各量定义与 4.1 一致。同步机容量越大,有功补偿越多,平均频率差越小,同捕时刻越往后移,如图 6 所示。

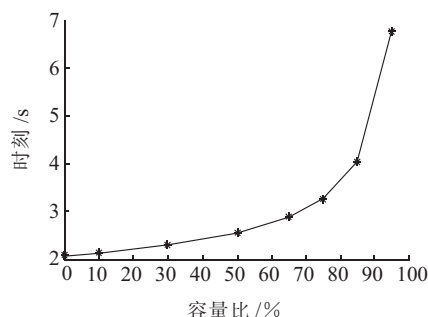


图6 第一个同捕点时刻随同步机与电动机容量比变化曲线

(3) 由表 1 中第 2 列数据可得快速切换时母线残压逐渐提高,且基本都在 0.85 以上。从残压角度来看,保证了备用电源快速切换的成功率。观察第 6 列数据可得同捕时刻残压值先增大,后减小。这主要是由于母线残压值主要由 2 个因素决定。一是母线失电后的无功补偿程度及励磁调节能力,功率因数一定时,主要体现在同步发电机的容量上,容量越大,无功补偿程度及励磁调节能力越好,残压水平越高;二是母线失电的时间对于同捕方式而言,随着同

步发电机与电动机容量比增大,同捕点时刻后移,即母线失电时间变长,残压水平降低。

由表 1 可以看出,快速合闸方式下残压值均能很好地满足切换要求的残压条件,而同捕方式下,不装设同步发电机时,残压值仅为 0.32 p.u.,低于 0.4 p.u.,即不满足安全切换的残压条件,而导致切换失败。而装设了同步机后,由于同步机的无功补偿及励磁作用,使得母线残压水平都能维持在 0.4 p.u.以上,满足了同捕切换时的残压条件。但相关文献[6,7]中提到,发电机低电压保护定值一般设为 0.8 p.u.,低频保护定值一般为 48 Hz,由表 1 数据来看,同步机与电动机容量比不同时,各同捕时刻总是比母线频率差为 1.5 Hz 的时刻小,说明同捕切换时频率不会低于 48.5 Hz,但同步机与电动机容量比较小,采用同捕切换时,母线残压水平不够高,会导致发电机低电压保护动作,将发电机切除。

5 结束语

目前许多工业企业在厂用母线侧加装了同步发电机,不仅提高了供电可靠性,加强了对本地重要设备的持续供电,同时对提高厂用电源切换的成功率也有较大帮助。综上所述,同步发电机在电源切换中有如下作用:(1) 同步机的有功补偿作用减慢了失电母线相角差拉开的速度。相同时间间隔内,间接地减小了二者的电压差,即减小了切换瞬间电动机的冲击电流,从冲击电流的角度提高了电源切换的成功率。(2) 同步机的无功补偿及励磁作用提高了失电母线的残压值,从残压角度提高了电源切换的成功率。(3) 随着同步机与电动机容量比增大,快速合闸方式下电源切换的成功率增大。而当同步机与电动机容量比较小,且采用同捕方式进行电源切换时,失电母线残压值可能会低于发电机保护定

值,导致发电机被切除。此时若因为快速合闸方式失效而不得不采取同捕方式进行切换时,可以适当切除一些负荷等级较低的负荷,来维持切换所需的残压条件。

参考文献:

- [1] WANG A Y, LING Z H, LIU W B. Residual Voltages Analysis in Reclosing Process for Induction Machine [C]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation .2008.
- [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] 郭 伟,胡敏美,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.
- [4] 西北电力设计院.电力工程电气设计手册电气二次部分[M].北京:中国电力出版社,1996.
- [5] 张培杰,孙国凯,车长海,等.关于厂用电源快切装置切换判据的探讨[J].电力自动化设备,2005,25(6):91-93.
- [6] 殷建刚,彭 丰,杨 平,等.发电机失磁保护中系统低电压判据的探讨[J].电力自动化设备,2003,23(12):28-31.
- [7] 王春华.浅谈低频保护测试[J].广东电力,2007,20(8):35-37.

作者简介:

- 张 翔(1986-),男,福建永安人,硕士研究生,从事基于分布式发电自动保护控制系统的研究工作;
- 卫志农(1962-),男,江苏江阴人,博士生导师,从事电力系统运行、分析与控制及其输配电自动化等的研究工作;
- 李 杰(1979-),男,江苏淮安人,工程师,从事电力系统自动化工作;
- 林 霞(1975-),女,福建福清人,博士,从事分布式发电系统保护及控制方面的研究工作;
- 苗世华(1979-),男,山西朔州人,工程师,从事电力系统自动化工作;
- 宗洪良(1970-),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力系统自动化及数字化变电站方面的工作。

Study of Power Transfer Procedure of Industrial Enterprise with Synchronous Generator Bus

ZHANG Xiang¹, WEI Zhi-nong¹, LI Jie², LIN Xia¹, MIAO Shi-hua², ZONG Hong-liang²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Wiscom System Co. Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Nowadays many petroleum and chemical industry factories have installed synchronous generators. It not only improves the reliability of power supply but also the success rate of plant standby power transfer. In this paper, the power transfer procedure of industry with synchronous generator bus and common switch ways were introduced. And the impacts of synchronous generator bus on power transfer procedure were discussed also. Finally, the simulation results verify that synchronous generators in industry factories can cooperate with the existing fast transfer devices to improve the success rate of power transfer.

Key words: industrial enterprise; fast transfer; delayed in-phase transfer; synchronous generator