

由系统谐振引发的热电厂复故障分析

苏文博¹, 童明光²

(1. 山东电力研究院, 山东 济南 250002; 2. 华能威海发电厂, 山东 威海 264205)

摘要: 阐述了某电厂由于谐振造成联络线路断路器跳闸后, 发电机单机带厂用电重负荷运行情况下, 出现厂用变压器跳闸、备用变压器短路及发电机被烧毁等一系列故障。从理论上分析了谐振导致局部过电压、过电流及发电机单机强励后造成机端电压升高的问题。讨论了单机运行的发电机在出力较小时, 突然带上几倍的重负荷而造成独立系统瓦解过程; 提出了避免类似故障的措施。

关键词: 热电厂; 复故障; 分析与处理; 系统谐波

中图分类号: TM 621; TM 732 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-6047(2005)04-0092-04

1 概述

岱庄热电厂的机组容量为 2×15 MW, 系统电气主系统接线图见图 1。岱庄热电厂与岱庄变电站相距 1 km, 为了避免 1 号和 2 号主变压器并联运行产生环流, 正常运行时 QF₆₁₀ 断路器处于断开状态。

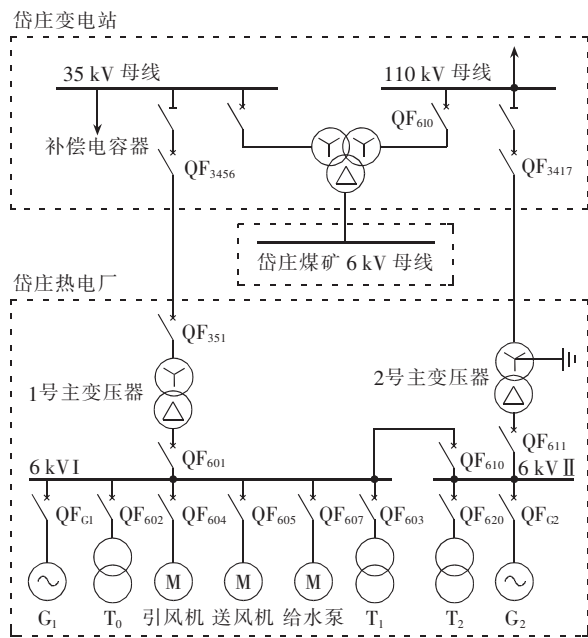


图 1 岱庄热电厂电气主系统接线图

Fig.1 The main electric system wiring diagram of Daizhuang power plant

2002 年期间 1 号主变压器差动保护先后动作了 4 次, 前 3 次保护跳开变压器断路器 QF₃₅₁, QF₆₀₁ 以后, 发电机 G₁ 单机带厂用电系统经过一段时间的调整, 能够安全停机。第 4 次故障是 2002 年 9 月 20 日发生的, 当时发电机 G₁ 的厂用电系统经 1 号主变压器从 110 kV 系统供电, G₁ 机组于 22:41:02 经 1 号断路器 QF_{G1} 并网成功。机组并列后, 进行增负荷

操作, 有功功率带到 0.676 MW、功率因数 0.8 时停止操作。并网运行 1 分多钟后, 110 kV 岱庄变电站联络断路器 QF₃₄₅₆ 跳闸, 1 号主变压器 35 kV 侧 QF₃₅₁ 断路器、6 kV 侧 QF₆₀₁ 断路器跳闸, 发电机主机房的照明灯瞬间骤亮后熄灭, 发电机 QF_{G1} 断路器跳闸, 厂用电源中断, 此时发电机发出一声巨响, 并有绝缘材料的焦糊味, 同时发电机上方升起了一团烟雾。1 号厂用变压器 T₁ 断路器 QF₆₀₃ 跳闸, 0 号备用变压器 T₀ 断路器 QF₆₀₂ 自投失败。保护的動作情况如下: QF₃₄₅₆ 断路器的过流保护动作, 1 号主变压器差动保护动作, 1 号厂用变压器时限过流保护动作, QF₆₀₄, QF₆₀₅, QF₆₀₇ 断路器的电动机过负荷动作, 1 号发电机差动速断保护动作, 1 号发电机复合电压闭锁过流保护动作, 0 号备用变压器速断保护动作。

检查发现: 1 号发电机的定子绕组 A、C 相绝缘击穿, 定子接地短路, 转子的 4 号轴瓦被电弧击伤, 转子轴键及键槽变形, 0 号备用变压器烧毁。此次事故暴露的问题是发电机单机瞬时带重负荷时必然引起功率振荡, 即单机系统难以稳定运行。

2 事故原因分析

2.1 系统谐振导致 QF₃₄₅₆ 断路器过流保护动作

岱庄变电站装有补偿电容器, 由于电容器的频繁投切, 曾多次引起局部系统的谐振现象。根据记录可知, 在 QF₃₄₅₆ 断路器过流保护动作之前煤矿电容器确有切除第 5 组的操作, 同时系统出现了过电流现象。谐振导致了电流的增大, 致使 QF₃₄₅₆ 断路器电流升到 530 A, 过流保护动作跳闸。保护定值为 $I_{dz} = 1.2 I_e = 6$ A, $t_{dz} = 0.5$ s。下面分析并联电容器导致谐振过电压、过电流的情况。

2.1.1 补偿电容对谐波的作用

由于电网谐波的存在, 当运行方式变化时, 系统参数则发生相应的变化, 对于有补偿电容的系统容易引起电流谐振使系统出现高电压和大电流。此外, 根据以往试验资料分析, 6 kV 电容器对三次谐波有放大作用。

2.1.2 谐波产生过电压原理分析^[1]

谐波作为电流源作用于系统中,对局部网络在不计外围电路的作用时的理想状况下,谐波作为电流源作用于 X_C 与 X_L 的计算电路^[2]见图 2,图中 I_S 为电流源谐波信号, $X_L = n\omega L$, $X_C = 1/(n\omega C)$, 设 X_L 与 X_C 的并联电抗为 X , 则

$$X = X_C X_L / (X_C - X_L) \tag{1}$$

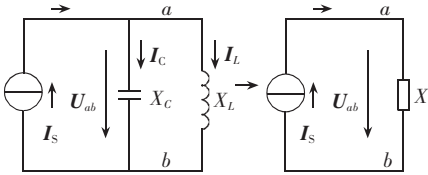


图 2 谐波作为电流源作用于 X_C 与 X_L 的计算电路

Fig.2 The calculational circuit for harmony wave acting as an electric current source on X_L and X_C

从式(1)中可知当 $X_C = X_L$ 时,电容器与电感器发生谐振,此时 X_C 与 X_L 之间进行能量交换。电容与电感上的电压 U_{ab} 及电流 I_C, I_L 计算如下:

$$U_{ab} = j\omega I_S = j\frac{X_C X_L}{X_C - X_L} I_S \tag{2}$$

$$I_C = \frac{U_{ab}}{-jX_C}, \quad I_L = \frac{U_{ab}}{jX_C}$$

显然,当 $X_C = X_L$ 时,即使 I_S 很小, U_{ab}, I_C, I_L 也趋于无穷大。

2.1.3 考虑外围系统影响时的电路分析

计入系统阻抗时的计算电路见图 3,根据图 3 有

$$U_{ab} = j\frac{X_S X}{X_S + X} I_S \tag{3}$$

从式(3)中可知,当系统阻抗计入 X_S 时,对谐振过电压 U_{ab} 的升高有抑制作用,同时对电容器与电感器的电流增大也有抑制作用。

2.1.4 实际系统与上述分析的统一性

经实测,电容器投入 $n = 4$ 组时,三次谐波的容抗 $X_C = 5.00 \Omega$, $X_L = 5.01 \Omega$, 此时 X_C 与 X_L 相接近。

验算结果表明保护整定无误,保护的静态试验检查结果也正常,由此断定保护动作正确。断路器 QF₃₄₅₆ 过流保护动作是由于并网操作及带负荷操作引发的谐振导致的,电容器的投切引起了谐振。

2.2 保护性能差导致 1 号主变断路器误跳闸

1 号主变保护性能出现问题,采样电流不能正确地反应输入值,静态测试在两端未加任何电流的情况下,电流显示值达到 2.25 A,超过保护整定值 1.25 A 而误动作。这表明该保护输入通道中已经存在故障。在 QF₃₄₅₆ 断路器过流保护动作跳闸之后,1

号主变保护误动作,或是属于抗干扰性能差导致电流从运行的 6.62 A 降到 0 之后,瞬态的变化使保护误动作;或是出现巧合,即输入通道错误积累输入的电流值,在 QF₃₄₅₆ 断路器跳闸之后正好在电流整定值 1.25 A 而动作跳闸。根据前 3 次误动的统计及保护在 QF₃₄₅₆ 断路器跳闸以后装置动作状况分析认为,这次保护动作系抗干扰性能差而引起的。

2.3 发电机出力低于厂用负荷导致发电机系统频率降低

在这之前,1 号主变差动保护投入运行之后曾经 3 次误动跳闸。前 3 次 1 号主变误动跳闸后 1 号机系统没表现出 1 号主变跳闸、0 号备变自投后,导致 0 号备用变压器烧毁的故障原因是保护误动都是在运行中 1 号机满负荷的情况下发生的,那时发电机的出力 15 MW 大于厂用 1.5 MW 的负荷。

此次 QF₃₄₅₆ 断路器跳闸对发电机其效果与主变断路器跳闸一样,即导致了 1 号发电机带厂用系统独立运行。故障是在发电机刚刚并网 1 min,负荷带到 0.676 MW 下发生的,而此时厂用电的负荷只有 1.4 MW,造成了小马拉大车的现象。尽管调速汽门能进行自动调节,但气量的存储仍不能满足其要求。因此,发电机系统频率降低到 47 Hz 以下,使电动机电流增加,发电机端电压下降。

尽管前 3 次没有造成发电机短路,但是由于励磁调节器的性能问题曾使发电机过电压。变压器跳开后,发电机电压升高,对系统造成过电压冲击,在很大程度上损害了发电机的绝缘,是造成本次发电机绝缘击穿短路的一个重要因素。

2.4 发电机系统电压的降低导致 1 号厂用变压器过流保护动作

发电机带厂用系统独立运行后,发电机只带 6 kV 电动机运行,由于频率降低、电压下降,导致 1 号厂变过载,其过电流保护动作,跳开 1 号厂用变压器。与此同时,由于 6 kV 电压低的问题使 6 kV 送风电动机、6 kV 引风电动机、6 kV 给水泵电动机过负荷,但过负荷并没有使电动机过流动作跳闸。

2.5 1 号厂用变压器跳闸后启动备用电源自投

1 号厂用变压器跳闸后启动备用电源自投装置,须经 0.7 s 的延时后动作于 0 号厂用变压器的断路器合闸。由于 400 V 电动机在由 1 号厂变带动时已经过电流,又断电 0.7 s,转速明显下降,再由备变带动 400 V 电机必然存在自启动过程,加剧了变压器的过电流程度,从而使 6 kV 系统电压进一步降低。

2.6 发电机系统电压的降低导致发电机强励动作^[3]

发电机电压降到 80 % U_e 时强励动作,使励磁电流上升 1.8 倍,以此维持发电机的端电压。发电机带备用变压器及电动机的计算电路见图 4,图中 E 为发电机电势; Z_G 为发电机电抗; Z_T 为变压器电抗; Z_D 为电动机电抗。根据发电机的空载试验特性曲线计算出此时发电机的电流、电压分布情况。

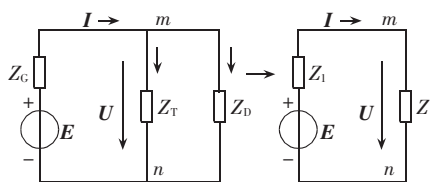


图 4 强励时的计算电路

Fig.4 The calculational circuit for compelling excitation

根据图 4 可知:

$$U = EZ / (Z_1 + Z)$$

$$\text{正常时: } U = |U| = \left| \frac{EZ}{Z_1 + Z} \right| = U_e = 6.3 / \sqrt{3} \text{ (kV)}$$

$$\text{强励前: } U = |U| = \left| \frac{EZ}{Z_1 + Z} \right| \leq 80\% U_e =$$

$$80\% \times 6.3 / \sqrt{3} \text{ (kV)}$$

80% U_e 时强励动作, 电压回升。

$$\text{强励后: } U = |U| = \left| \frac{1.8EZ}{Z_1 + Z_2} \right| =$$

$$1.8 \times 80\% \times 6.3 / \sqrt{3} \text{ (kV)}$$

考虑到转子饱和因素及发生短路 2 s 后, 机端励磁因发电机电压降低对励磁电流的影响, 强励后发电机电压 $U < 1.8 \times 80\% \times 6.3 / \sqrt{3} \text{ kV} = 1.44 U_e$, 实际上 6 kV 母线电压到达 8.2 kV 是额定值的 1.3 倍, 与理论值相接近, 厂房灯骤亮就发生在此时。

2.7 过电压与过电流共同作用导致发电机相间短路^[4]

在发电机强行励磁及电动机自启动的影响下, 导致发电机的过电压与过电流, 致使 A、C 发生相间对地短路, 发电机差动速断保护动作。

发电机差动速断保护动作 0.7 s 后, 0 号变压器速断、瓦斯保护动作跳开了 0 号备用变压器的 QF₆₀₂ 断路器及低压侧 QF₀₀₂ 断路器。

根据发电机差动速断动作 0.7 s 以后, 0 号备用变压器保护再次动作的现象可断定, 在发电机保护动作后并没有跳开 QF_{G1} 断路器, 致使短路电流没有得到及时限制。0 号备变的短路电流最高达 3.48 kA。

励磁断路器虽然已跳闸, 但发电机的灭磁时间常数空载下为 9 s, 三相短路时大约为空载状况下的 1/3, 相间短路则大于 1/3。即使按 3 s 计算, 从发电机差动保护动作出口, 到 0.7 s 后, 0 号励磁变压器跳闸, 到发电机转子回路灭磁结束, 发电机一直在提供短路电流, 致使发电机的损坏程度相当严重。最后, 发电机出口断路器是在故障发生 53 min 以后手动断开的。

3 事故过程中的疑点分析

3.1 DCS 记录中保护动作信号比开关动作信号晚

在分散式控制系统 (DCS) 的事故追忆记录中, 保护的動作时间比开关的跳闸时间晚 100 ms, 其原因主要是保护跳闸出口继电器比信号继电器动作快,

致使保护动作开关跳开后, 保护动作信号才能送出。

3.2 DCS 记录中发电机差动速断信号送出 4 次

在 DCS 的事故追忆记录中, 发电机差动速断保护动作信号共给出 4 次, 间隔 200 ms。说明该保护一直没有返回。DCS 送出的后 3 次显然是误动输出。

3.3 备用电源自投动作 3 次

备用电源自投的第 1 次启动是 1 号厂用变压器跳闸后切换 0 号备用变压器的正常启动。第 2 次启动是在 6 kV 母线没有电流的情况下值班人员对 1 号厂用变压器送电失败, 退出 1 号厂用变压器后切换 0 号备用变压器的启动, 第 3 次与第 2 次操作重复。显然备用电源自投在没有备用电源的情况下启动是错误的, 应该加备用电源电压允许启动信号。

4 防范措施

4.1 解决谐振问题

对煤矿供电的 35 kV 补偿电容器增加电抗器的补偿, 使其滤除 3, 5, 7 次谐波以避免由此引起的谐振问题。

4.2 解决发电机系统的缺陷

对 QF₆₁₀ 断路器增加自投功能, 在 2 台变压器运行中, 6 kV 联络断路器不能投入, 但任一变压器退出后, I, II 段出线应具备互为备用的条件。在备用电源没有落实的情况下, 当线路负荷大于发电机出力而线路停电时, 线路断路器应联动发电机断路器停机, 以消除小马拉大车之类的事故。

强行励磁的作用是发电机并网运行以后, 当系统出现故障, 无功缺额严重时, 通过强励能及时输送无功, 保证系统的稳定。但对于单机运行的发电机强励的作用已经失去, 因此当机组转入单机系统运行时应增加联动功能将其退出。此外, 为了便于事故分析应增加强励动作的记录功能。

4.3 解决备用电源设计上的缺陷^[5]

备用电源与工作电源取自发电机出口的 6 kV 母线上, 在 QF₆₁₀ 不能并环运行的情况下, 当 1 号工作变压器失去电源后, 备用变压器必然也失去了电源, 显然自投也没有作用。应从 110 kV 岱庄站单设一条 0 号备用电源线解决备用电源的问题。除去备用电源自投的延时, 增加工作变压器主保护动作启动、工作变压器分支过电流闭锁条件。

4.4 解决保护误动作问题^[6]

变压器保护在性能上存在着严重问题, 应该予以更换。

4.5 提高运行人员的技术水平

运行人员的水平直接影响到安全生产的每个环节, 在厂用电恢复过程中, 有 3 次明显的误操作, 并且从 6 kV 系统停电到恢复厂用供电共用 1 h 的时间, 这充分暴露出了运行人员业务素质差的问题。运行人员对专业工作的研究不够, 对规程的有关规定不

熟练,对事故的预想不充分,一旦出事后手忙脚乱,误操作。因此,必须注意其专业培训,提高水平,增强素质,减少事故。

参考文献:

[1] 崔家佩,孟庆炎,陈永芳,等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京:中国水利电力出版社,1993.
[2] 邱关源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社,1999.
[3] 苏文博,李鹏博,张高峰. 继电保护事故处理技术与实例[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
[4] 华北电力学院. 电力系统故障分析[M]. 北京:电力工业出版社,1980.

[5] 毛锦庆,赵自刚,马 杰,等. 电力系统继电保护实用技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
[6] 国家电力调度通讯中心. 电力系统继电保护规程汇编[M]. 北京:中国电力出版社,2001.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

苏文博(1958-),男,山东寿光人,高级工程师,从事电气事故处理技术研究工作(E-mail:yzc2103@sina.com;yzc2103@163.com);
童明光(1962-),男,山东威海人,高级工程师,博士研究生,从事发电厂生产管理工作。

Analysis of multi-fault caused by syntony in power plant

SU Wen-bo¹,TONG Ming-guang²

(1. Shandong Electric Power Research Institute, Ji'nan 250002, China;
2. Huaneng Weihai Power Plant, Weihai 264205, China)

Abstract: After the trip of the tie line breaker caused by syntony, a series of faults occurred in a power plant under the operating condition of single generator with heavy plant loads, such as auxiliary transformer tripping, standby transformer short-circuit and generator burnout and so on. The generator terminal voltage rising caused by the local over-voltage, over-current and single-generator compelling excitation during system syntony is theoretically analyzed. The collapse progress of single generator system is discussed, which is operating with a small output and exerted a heavy load suddenly, and the measures to avoid similar faults are suggested.

Key words: thermal power plant; multi-fault; analysis and processing; system syntony