

区外故障引起的发电机功率突降保护误切机动作分析

蒋琛¹, 刘亚南¹, 唐一铭¹, 曹海欧², 韩叶松³

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210029; 3. 江苏国信扬州发电有限责任公司, 江苏 扬州 225131)

摘要:在发电机组甩负荷初始状态时,发电机功率突降保护装置可快速作出判断并安全停机。文中描述了某电厂出线故障引起功率振荡,发电机组功率变送器传变周期与汽轮机数字电液控制系统(DEH)的设定值不匹配,且波形发生畸变,继而造成机组调门误关闭,功率突降保护动作导致跳机的事件,分析了此动作事件成因,并就如何防范与解决大型机组发生类似问题提出了合理化建议和改进思路。

关键词:区外故障;系统振荡;功率突降保护;功率变送器;负荷干扰控制

中图分类号:TM772

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)01-0159-06

0 引言

目前,江苏省内新建汽轮发电机组出线多采用“同杆并架”的设计方式,可以节省大量投资。但当对侧变电站发生母线故障或者线路开关偷跳时,将直接导致发电机组功率无法送出,此时若发电厂未设置功率突降保护或超速保护不动作,极易造成汽轮机超速、发电机变压器组过电压等恶劣后果,这对发电厂安全生产构成重大威胁。因此,功率突降保护装置被广泛应用以解决该问题^[1-3]。

随着国内大型机组日趋增多,发电机组与电网之间的联系也越来越紧密。如何提高机组和电网发生异常或故障时机网之间的协调能力,提高电厂继电保护、热工技术,提升设备的稳定性就成了发电技术的一个新课题^[4-7]。

文中针对江苏某电厂送出线路区外故障,引起功率振荡,导致机组全停事件进行原因分析,阐述防范措施,为解决国内机组可能存在的类似隐患提供了合理化建议和改进思路。

1 设备概况与事件经过

江苏某电厂2台600 MW机组正常运行,升压站采用双母线接线方式,送出线为4条220 kV线路,母联开关正常合环运行。机组汽轮机数字电液控制系统(digital electric hydraulic control system, DEH)采用西门子T3000控制系统,通过数字计算机、电液转换机构、高压抗燃油系统和油动机控制汽轮机主汽门、调节汽门的开度,实现对汽轮机组转速和负荷的实时控制。

机组送出线路区外,电网某处发生B相接地故

障,30 ms后单相接地消失,之后120 ms衍变为三相短路。因故障线路未装设全线速动保护,故三相故障后后备距离保护II段延时300 ms才动作切除故障,致使整个故障持续时间为450 ms。

因三相故障持续时间较长,造成电网负荷波动较大,波动过程持续3个周期,历时2.67 s左右。系统波动造成发电机机端二次相电压最低至36 V(额定电压的62%)左右,主变高压侧二次相电压最低至26 V(额定电压的45%)左右。整个过程中发电机端二次电压的最大变化幅度超过27 V,主变高压侧二次电压的最大变化幅度超过40 V。发电机端二次电流最高达到8.8 A(额定电流为4.23 A),超过额定电流2倍。

在机端电压波动过程中,厂用电电压也随之波动,使锅炉给煤机跳闸,导致锅炉主燃料跳闸(main fuel trip, MFT)。此外,因发电机功率变送器存在传变周期与DEH刷新频率不匹配且波形畸变的情况,故系统振荡时,满足汽机快控功能(又称负荷干扰控制功能,简称KU)动作条件,使得调门快速关闭。当机组有功功率降至发电机额定功率的12%以下时,功率突降保护动作停机。

2 原因分析

2.1 给煤机变频器控制回路

给煤机变频器控制回路电源使用厂用400 V系统,由变比为380 V/115 V的稳压变供电。当系统发生三相故障时,因发电机机端电压降到额定电压的62%,380 V电压降至236 V,致使给煤机变频器控制回路中的1ZJ继电器线圈电压降至67 V以下,低于1ZJ继电器动作值(70.2 V),其结果是变频器发给煤机停运信号,5台运行中的给煤机同时发停

运信号,致使燃料消失保护动作启动锅炉 MFT,根据正常炉-机-电跳闸动作逻辑,锅炉 MFT 动作后启动汽机跳闸,汽机跳闸动作后,电气逆功率保护动作全停。

2.2 功率变送器

该电厂采用传统的模拟式有功功率变送器,采集发电机电压、电流量,利用时分割乘法器原理产生模拟量功率信号^[8-10]。有功功率变送器的功率信号送至 DEH 系统,作为其测量及控制的基础。

由于国标对于模拟式有功功率变送器的暂态性能(电网发生故障时变送器输出量的特性)并没有要求,故变送器产品暂态性能较差,容易发生功率畸变^[11-12]。畸变原因可能是故障电流过大或含有的非周期分量导致变送器内小电流互感器饱和,从而使参与计算的电流量畸变,变送器输出信号放大了实际功率变化值。

由于控制系统波形无法调取,故从电厂 DEH 曲线推断得:在系统振荡过程中,发电机实际输出功率的变化并没有达到 DEH 中关于调门快控的规定值,但由于变送器输出功率畸变,DEH 监测到机组有功功率大于功率跳变限值,误以为满足 KU 触发条件(①突然出现负荷干扰大于负荷跳变限值,②负荷控制偏差大于设定值,两者同时满足),从而导致调门快速关闭,发电机输出功率突降。

2.3 功率突降保护

当汽轮机发生正功率突降时,若动力原因造成突降,则锅炉及汽机保护先动作,然后机跳电逻辑实现发变组保护出口全停;若功率送出系统原因引起功率突降,则由送出系统(一般是线路保护)远方投切回路联跳发变组保护实现出口全停。

功率突降保护就是在发电机突然甩负荷或者由于输电线路故障,发电机无法输出功率时,迅速动作关闭主汽门、灭磁、解列,以防止发电机组超速、升压,从而保证发电机组汽轮机、锅炉等主设备安全。该电厂在锅炉 MFT 触发炉跳机过程中,功率突降保护动作出口条件满足,触发出出口动作跳闸,实现了机组安全停机。

功率突降保护逻辑判据分为启动判据、动作判据、闭锁条件 3 部分。

2.3.1 启动判据分析

当发电机功率大于保护投入功率定值时,保护功能投入。启动判据由电压突增判据和频率突增判据构成,逻辑如图 1 所示。图中: ΔU_{fl} , ΔU_{flset} 分别为发电机机端正序电压突变量实测值、整定值; ΔU_{tl} , ΔU_{tlset} 分别为主变高压侧正序电压突变量实

测值、整定值; f , f_{set} 分别为发电机频率实测值、整定值; Δf , Δf_{set} 分别为发电机频率变化量实测值、整定值; P_G , $P_{set.1}$ 分别为发电机有功功率实测值、整定值 I 段; T_0 为判据判别延时。

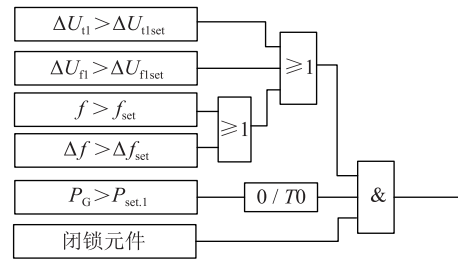


图 1 启动逻辑

Fig.1 Start up logic

装置启动前,机组负荷约为 $44.3\% P_N$ (P_N 为发电机额定有功功率),大于保护投入功率定值(设定值为 $25\% P_N$),保护功能投入。装置启动时机组频率曲线如图 2 所示。

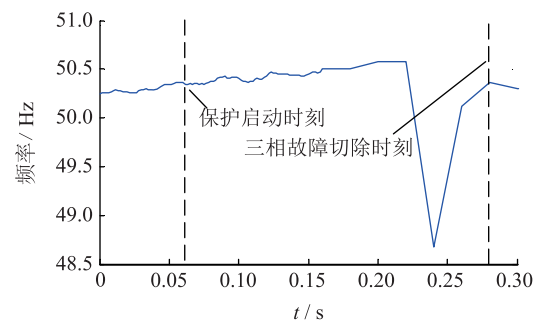


图 2 频率曲线

Fig.2 Frequency curve

在 0.06 s 时,机组频率已经上升到 50.34 Hz,上升速率约 1.5 Hz/s ,大于频率突增定值 0.28 Hz/s ,满足频率突增条件。

根据以上分析,保护投入功率条件、频率突增条件满足,切机功能投入。

2.3.2 动作判据分析

动作判据由低功率判据、电流突降判据和低电流判据构成,逻辑如图 3 所示。

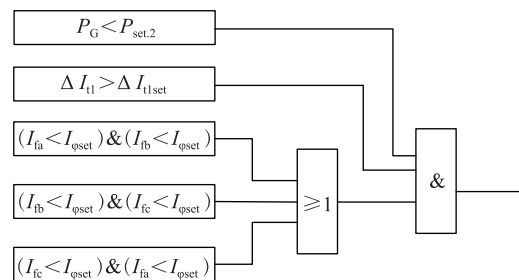


图 3 动作逻辑

Fig.3 Action logic

图中: ΔI_{11} , ΔI_{11set} 分别为主变高压侧正序电流突变量实测值、整定值; I_{fa} , I_{fb} , I_{fc} 分别为发电机机端 A, B, C 相正序电流; $I_{\varphi set}$ 为发电机机端电流整定值; P_G , $P_{set,2}$ 分别为发电机有功功率实测值、整定值 II 段。

2.738 s 时, 机组有功功率 P 降至 11.68% P_N , 达到装置低功率定值, 如图 4 所示。

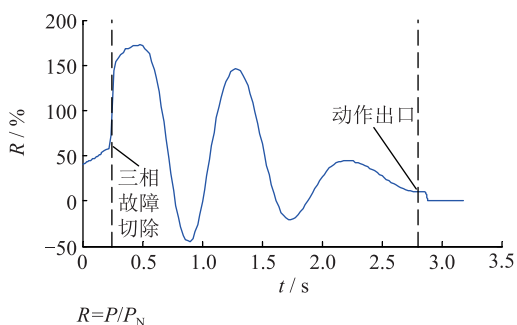


图 4 有功功率曲线

Fig.4 Active power curve

2.52 s 时(第 3 个振荡周期)主变高压侧电流突降值为 0.113 6 A, 高于主变高压侧正序电流突降定值 0.11 A, 如图 5 所示。

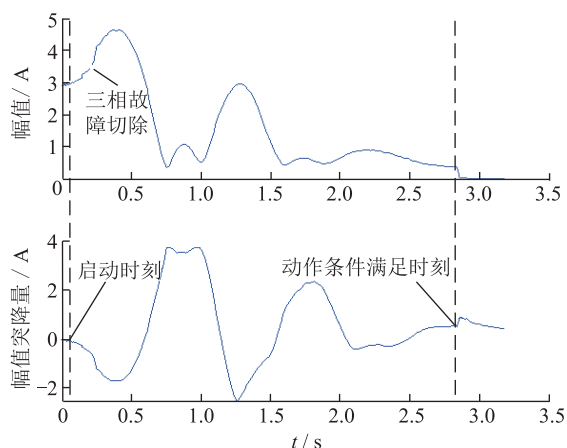


图 5 主变高压侧电流幅值及突降量

Fig.5 Current amplitude and dump of main transformer's high voltage side

2.71 s 时, 发电机正序电流最低降至 0.88 A, 小于发电机机端低电流定值 1.01 A, 如图 6 所示。

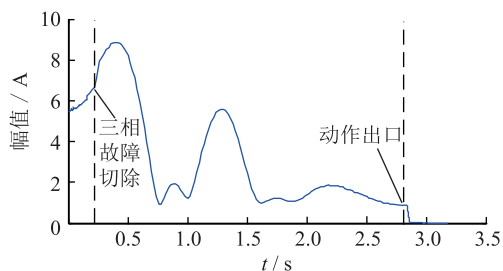


图 6 发电机正序电流

Fig.6 Positive sequence of generator

2.3.3 闭锁判据分析

闭锁判据由正序过电压判据和负序欠电压判据构成, 逻辑如图 7 所示。

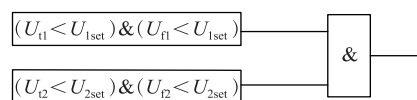


图 7 闭锁逻辑

Fig.7 Blocking logic

图中: U_{1set} 为正序电压整定值; U_{2set} 为负序电压整定值; U_{11} 为发电机机端正序电压; U_{11} 为主变高压侧正序电压; U_{12} 为发电机机端负序电压; U_{12} 为主变高压侧负序电压。

零功率保护动作前, 发电机和主变正序电压始终高于闭锁定值 49.1 V, 不满足正序电压闭锁条件。发变组三相电压对称, 故负序电压始终偏低, 也不满足负序电压闭锁条件。

2.4 线路保护

2 套保护均配置光纤差动、三段式距离、零序过流等保护, 故障期间, 保护装置及线路故障录波器均启动。

由于故障发生在电站送出线变电站的下级线路, 故电厂侧光纤差动保护、距离 I 段保护、距离 II 段保护均未动作。距离 III 段整定时间为 3.8 s, 时间较长, 故距离 III 段保护未动作。系统单相接地故障持续 30 ms, 零序 II 段、III 段延时分别为 2 s, 3.8 s, 故零序 II 段、III 段保护均未动作。

2.5 发变组保护

该电厂发变组保护南瑞继保 PCS-985 系列, 有发电机保护、变压器保护、高厂变保护等。故障过程中, 保护启动, 但均未动作, 动作行为正确。

综合以上研究分析, 可以得出发生事故的主要原因: (1) 给煤机跳闸触发锅炉全燃料中断信号; (2) 下级线路故障造成功率大幅波动, 触发调门快控功能动作, 调门关闭后机组功率下降, 达到保护动作条件, 引起零功率保护动作, 机组解列。

3 防范措施

功率突降保护是在机组无法正常输出功率时动作, 线路故障会引起功率振荡, 然而不应该造成机组跳闸, 因此这是一起由于线路故障造成零功率切机动作的误动事件, 需要进一步分析并采取相应的防范措施, 消除机组的误跳隐患。

(1) 该机组给煤机的低压变频器不具备低电压和高电压穿越能力(现有的一类辅机高低电压穿越能力标准讨论稿称: 电压低到 20% U_N , U_N 为低压

母线额定线电压,运行 0.5 s;低到 60% U_N , 运行 5 s;低到 90% U_N 时长期运行;高电压 130% U_N 时运行 0.5 s),是电厂安全运行的隐患,应积极落实整改,对于已投运变频器应对其控制部分和动力部分进行整体改造,如外加串联不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)等措施,从根本上解决变频器控制、动力部分固有问题,确保机组一类辅机具有高电压、低电压穿越能力。

若受客观条件所限,暂时无法实施改造措施,则可以根据辅机设备能力、电厂安全运行要求、变频器安全经济能效比等因素,考虑对优化分散控制系统(distributed control systems, DCS)进行优化。以低压给煤机为例,当全厂给煤机变频器低电压动作瞬时全部停运时,煤仓内剩余煤粉仍可短时运行,不用瞬时触发锅炉 MFT。若在短小时内厂用电电压能及时恢复正常,给煤机变频器则配合自启动;若厂用电电压未能及时恢复,则给煤机变频器正常停运。给煤机变频器 DCS 控制策略优化可以考虑在厂用电瞬间失去或波动时防止热工自动回路切换的逻辑,即在这短暂的时间内热工自动回路不进行切换,保证整个锅炉控制系统不产生大的扰动;从 DCS 送给煤机的启动指令应在厂用电电压波动或瞬间失去恢复后能够自动启动给煤机,即将 DCS 启动给煤机的指令由脉冲改为电平形式;给煤机就地控制柜的逻辑应保证在厂用电电压波动或瞬间失去恢复后,能够在 DCS 远方控制等措施^[13-15]。

(2) 在外部故障发生至切除期间,从机组 DCS 画面查看,机组负荷均出现大幅波动。目前,国内多数电厂在电气侧选用的功率变送器为国产三相三线制功率变送器,响应时间一般为 250 ms,测量稳态功率信号时,效果较好,但当功率突变时,由于响应能力的制约,其输出可能产生畸变。省外也发生过多起由于功率变送器输出波形畸变造成机组非计划停机的情况。故对于 T3000 DEH 系统,建议改用动态性能更为可靠的功率变送器,目前新型功率变送器可在暂态时由稳态测量绕组切换至保护绕组进行计算,有效地解决了电流互感器饱和问题;另一方面新型功率变送器响应时间一般小于 30 ms,与实际功率拟合度较高,与控制系统计算周期和刷新率可以很好地进行匹配^[16]。

另外发电厂热控专业一般要求提供 3 个功率功率变送器信号以便在逻辑上进行“三取二”配置,因此一般都会在电气系统设置多个有功功率变送器,但这些变送器电压回路却取自同一组电压互感器的二次绕组,辅助电源也取自同一个电源开关,带

来许多安全隐患。一旦在机组运行中发生电压互感器二次绕组断线或变送器辅助电源失电,会造成变送器输出归零或功率信号减半,严重影响机组调节,甚至造成停机。故建议参与机组协调的功率变送器应分别从电压互感器的 3 个绕组取得机组电压信号输入,变送器电源可从 2 套机组不间断电源输出,保安电源取得 3 路互相独立的交流辅助电源;也可以在不降低设备运行可靠性的前提下,尽量减少电流互感器、电压互感器二次负载,如采用双输出功率变送器,以提高变送器测量精度。

(3) 当机组功率突降后,在发电机电抗和主变电抗上的电压降消失,在很短的时间内发电机励磁调节器来不及反应,故引起主变高压侧和发电机端正序电压突升,而机端电流会随即衰减,衰减时间由电流互感器负荷电流以及二次回路衰减常数决定。故可在启动或者动作逻辑中可考虑增加电压突升、电流突降等辅助判据,防止机组振荡时功率突降保护误动作。

主变高压侧正序电压突升值如式(1)所示:

$$\Delta U/\Delta t = \left[\frac{P_G \tan \varphi}{S_B} (X_d' + X_T) \frac{U_n}{K} \right] / \Delta t \quad (1)$$

式中: ΔU 为突变时间内电压突变值; Δt 为突变时间; P_G 为发电机有功功率; φ 为额定功率因素角; S_B 为基准功率; X_d' 为折算后直轴瞬变电抗饱和值; X_T 为折算后主变短路阻抗; U_n 为二次额定电压; K 为灵敏系数。

机端正序电压突升值如式(2)所示:

$$\Delta U/\Delta t = \left(\frac{P_G \tan \varphi}{S_B} X_d' \frac{U_n}{K} \right) / \Delta t \quad (2)$$

机端电流突降值如式(3)所示:

$$\Delta I/\Delta t = (I_{\text{load}} - I_{\text{load}}') / \Delta t = \left[I_{\text{load}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] / \Delta t \quad (3)$$

式中: ΔI 为机端电流变化值; I_{load} , I_{load}' 分别为功率突降前、后机端电流互感器二次负荷电流; τ 为功率突降后电流互感器二次回路衰减时间常数,其值由二次电缆长度、截面、电流互感器剩磁大小等因素决定。

在功率突降保护自身逻辑功能优化的同时,也可以考虑对功率突降保护定值进行优化。如适当延长动作时间,以可靠躲过失灵保护动作时间,目前省内 220 kV 及以上电压等级失灵保护动作时间约为 0.2~0.3 s,考虑到回路整组时间,可将功率突降保护延时动作时间整定至 0.4~0.5 s。另外可适当增加启动判据中频率突增定值。以省内某 660

MW 机组为例,发电机组总转动惯量为发电机转动惯量、汽轮机转子惯量、高压转子惯量、低压转子惯量之和。故机组惯性常数如式(4)所示:

$$M = \frac{J\omega_0^2}{S_N} \quad (4)$$

式中: M 为机组惯性常数; J 为发电机组总转动惯量,取 7 167.7 MPa; S_N 为发电机额定容量,取 667×10^6 W; ω_0 为发电机角速度。经计算得 M 为 10.596 s,故对于大型火电机组, M 一般约为 10 s。发电机功率突降到零时的 df/dt 值为如式(5)所示:

$$\frac{df}{dt} \approx f_0 \frac{P_G \cos\varphi}{P_N M} \quad (5)$$

式中: f_0 为发电机额定频率; $\cos\varphi$ 为发电机额定功率因素,取 0.9。考虑 DEH 在频率变化中的作用, df/dt 元件应有较高的灵敏度,故取 3。当 $P_G = 25\%P_N$ 时,可得到 $\left(\frac{\Delta f}{\Delta t} > \right)_{\text{set}}$ 为 0.375 Hz/s。故对于采用 $f >$ 元件,定值可取 50.4 ~ 50.5 Hz。

(4) 局部电网振荡主要成因是电网系统呈弱阻尼特性,一旦系统发生扰动,易形成电网振荡。故发电厂电力系统稳定器(power system stabilization, PSS)应按照要求进行相关涉网试验并对其参数进行测定,机组并网后 PSS 功能必须投入运行,可以抑制系统低频振荡,从而降低功率突降保护误动的风险。

4 结语

功率突降保护在电厂送出线路出现异常时,能够有效保护设备的安全,然而系统振荡造成功率突降保护误动作的事件也时有发生。文中通过分析事件经过及原因,提出了合理化建议和改进思路,消除了大型发电机组在线路故障时由于功率振荡造成机组误跳的隐患,保证了机组和电网的安全稳定运行,具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 乔永成,寇海荣,王云辉,等. 发电机零功率保护[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):148-151.
QIAO Yongcheng, KOU Hairong, WANG Yunhui, et al. Zero power protection of generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 148-151.
- [2] 林长鹏,张晓亮,张宝红. 火力发电厂零功率保护整定计算方法[J]. 黑龙江电力,2013,35(2):156-158.
LIN Changpeng, ZHANG Xiaoliang, ZHANG Baohong. Setting calculation of zero-power protection for thermal power plant [J]. Heilongjiang Electric Power, 2013, 35(2): 156-158.
- [3] 兀鹏越,杨博,王海涛,等. 火电机组零功率保护的应用研究[J]. 中国电力,2014,47(9):107-111.

- WU Pengyue, YANG Bo, WANG Haitao, et al. Application research of zero power protection for thermal power plants [J]. Electric Power, 2014, 47(9): 107-111.
- [4] ARABI S, KUNDUR P, HASSINK P. Small signal stability of a large power system as affected by new generation additions [C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society T&D Conference, 2000:812-816.
- [5] 李玮. 零功率切机保护的技术探讨与论证[J]. 华北电力技术,2014(10):15-20.
LI Wei. Technology research and demonstration of zero-power tripping protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014(10): 15-20.
- [6] 王可山. 零功率切机保护在大型火电厂的应用[J]. 能源与节能,2011(4):80-82.
WANG Keshan. Application of zero-power tripping protection for large thermal power plant [J]. Energy and Energy Conservation, 2011(4): 80-82.
- [7] 韩涌. 零功率切机保护在吕四港电厂的应用[J]. 中国科技投资,2012(33):78-79.
HAN Yong. Application of zero-power tripping protection in Lvsu power plant [J]. China Venture Capital, 2012(33): 78-79.
- [8] 钱伟康,方宗达. 影响时分割乘法器准确度的主要因素分析[J]. 上海理工大学学报,2002,24(3):268-271.
QIAN Weikang, FANG Zongda. Analysis on main factors influencing accuracy of time-division multiplier [J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2002, 24(3): 268-271.
- [9] 黄纯,何怡刚,江亚群,等. 交流采样同步方法的分析与改进[J]. 中国电机工程学报,2002,22(9):39-43.
HUANG Chun, HE Yigang, JIANG Yaqun, et al. Analysis and improvement of synchronization [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 39-43.
- [10] LU Zuling. An error estimate for quasi-integer period sampling and an approach for improving its accuracy [J]. IEEE Trans on IM, 1988, 37(2): 219-222.
- [11] 张宝,杨涛,项谨,等. 电网瞬时故障时汽轮机汽门快控误动作原因分析[J]. 中国电力,2014,47(5):18-22.
ZHANG Bao, YANG Tao, XIANG Jin, et al. The cause analysis of steam turbine valve control misoperation caused by grid instantaneous fault [J]. Electric Power, 2014, 47(5): 18-22.
- [12] 杨涛,黄晓明,宣佳卓. 火电机组有功功率变送器应用分析[J]. 中国电力,2016,49(6):53-56.
YANG Tao, HUANG Xiaoming, XUAN Jiazhao. Analysis on application of active power transducer in thermal power generating units [J]. Electric Power, 2016, 49(6): 53-56.
- [13] 周道军. 变频器防低电压穿越分析[J]. 江苏电机工程,2015,34(2):37-40.
ZHOU Daojun. The Analysis of frequency converter prevent low voltage ride through [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(2): 37-40.
- [14] 姚新阳,黄学良,顾文,等. 火电机组一类辅机变频器低电压穿越改造技术研究[J]. 电气技术,2015(12):26-30.

- YAO Xinyang, HUANG Xueliang, GU Wen, et al. Research on the low voltage ride through reconstruction technology for frequency converter of thermal power unit auxiliary equipment [J]. Electrical Engineering, 2015(12): 26-30.
- [15] WANG Xiaoyu, TAO Zhang, SHU liu, et al. Ride-through for important auxiliary equipment drive inverter [C]//Power and Engineering Conference, 2014:1-5.
- [16] 董亮, 马皓, 王小瑞, 等. 基于滑动平均电压电流相移的数字化功率计算方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 51-56.
- DONG Liang, MA Hao, WANG Xiaorui, et al. A modified digital power calculating method based on sliding averaging and phase shifting of voltage and current [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 51-56.

作者简介:



蒋琛

蒋琛(1981—),男,本科,工程师,从事电力系统继电保护及大型发电机组调试工作(E-mail:15905166885@126.com);

刘亚南(1988—),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护工作(E-mail:lynwyx@163.com);

唐一铭(1990—),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护工作。

Analysis of Power Sag Protection Operation Caused by an External Fault

JIANG Chen¹, LIU Yanan¹, TANG Yiming¹, CAO Haiou², HAN Yesong³

(1.Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210029, China;

3. Jiangsu Guoxin Yangzhou Power Generation LLCO., Yangzhou 225131, China)

Abstract: In the initial stage of generator load-shedding, generator power sag protection devices can judge quickly and shut down safely. Power oscillation was caused by a power plant outlet line failure. The transmission cycle of the generator power transmitter was not matched with the set of steam turbine digital electro-hydraulic control system, and the waveform was distorted. In turn, the unit control valve was shut down by mistake, and the action of power sag protection caused the generator-tripping. This paper analyzes the causes of this action and puts forward some suggestions on how to prevent and solve similar problems in large units.

Key words: external fault; system oscillation; power sag protection; power transmitter; load disturbance control

(编辑 方晶)