

基于 ADPSS 大区电网混合仿真的直流系统 辅助控制建模

朱玲¹ 王骅²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 河南电力试验研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 在基于 ADPSS 的大区交直流电网混合仿真中, 直流输电控制模型不够完善, 影响直流系统的运行特性。对直流控制器原理进行研究, 探讨了直流系统无功消耗、关断角、换相角、直流电流等变量之间相互关系, 利用程序自定义功能, 建立了考虑分接头调整和无功补偿装置投切联合控制的直流辅助控制模型。仿真分析了大区电网直流功率提升时辅助控制模型的动作特性, 验证了模型的正确性和有效性。仿真结果表明, 辅助控制模型能够维持换流站的无功平衡, 将直流运行参数控制在合理范围内, 减少“换相失败”发生的风险, 适用于大规模电网的运行特性和协调控制研究。

关键词: 混合仿真; 直流输电; 用户自定义模型; 分接头控制; 无功补偿

Abstract: The inadequate model of control system for HVDC affects the operation condition of DC system negatively in hybrid simulation of large-scale AC/DC power systems on the basis of advanced digital power system simulator (ADPSS). After the research of the principle of DC controller and the relations among such variables as reactive power consumption, extinction angle, commutation angle and DC current, the auxiliary control model of DC system considering the combined control of tap changer adjustment and reactive power compensation device switching is established using the user-defined model (UDM) function provided by the software. The auxiliary control behavior during DC power increasing is analyzed in the simulation to verify the correctness and effectiveness of the proposed model. The simulation results show that the auxiliary control model can sustain the balance of reactive power in converter station and restrict DC operating parameters to a reasonable range so as to reduce the risk of "commutation failure", which is suitable for the research of operating characteristics and coordinated control strategy of large-scale power grid.

Key words: hybrid simulation; HVDC; user-defined model; tap changer control; reactive power compensation

中图分类号: TM743 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0033-06

0 引言

随着中国西电东送和跨大区联网战略的逐步实施, 直流系统的运行控制特性对电网安全稳定运行所造成的影响程度和影响层面越来越突出^[1-4]。

当前使用较为广泛的仿真软件均考虑直流输电环节。机电暂态仿真软件(常见的有 BPA、PSASP 和 PSS/E 等)采用的直流准稳态模型无法实现对直流系统动态特性的精确仿真^[5-6]。PSCAD/EMTDC 是目前公认较权威的包含直流输电系统的电磁暂态仿真软件, 但其所能模拟的系统规模较小, 需要对电力系统进行等值简化, 降低了计算分析的准确性^[7-10]。

近年来, 中国电力科学研究院研究并开发的电

力系统实时仿真装置(advanced digital power system simulator, ADPSS)在含 HVDC 的大电网仿真研究中的应用得到广泛关注。ADPSS 可应用于机电-电磁混合仿真的模式, 既详细模拟 HVDC 内部快速暂态变化过程, 又不需要对外部网络简化等值, 大大提高仿真分析的准确性^[11-13]。但是 ADPSS 电磁暂态程序 ETSDAC 提供的直流控制系统模型缺乏相应的直流辅助功能控制模块, 控制特性较工程实际尚有较大差距。

为了解决上述问题, 利用 ADPSS 电磁暂态程序 ETSDAC 的用户自定义功能, 以 Simens 的直流辅助控制为参考, 建立了换流变压器分接头控制和换流站无功控制的辅助控制模型; 探讨了直流系统无功消耗、关断角、换相角、直流电流等变量之间相互关系, 提出分接头调整和无功补偿装置投切的联合控

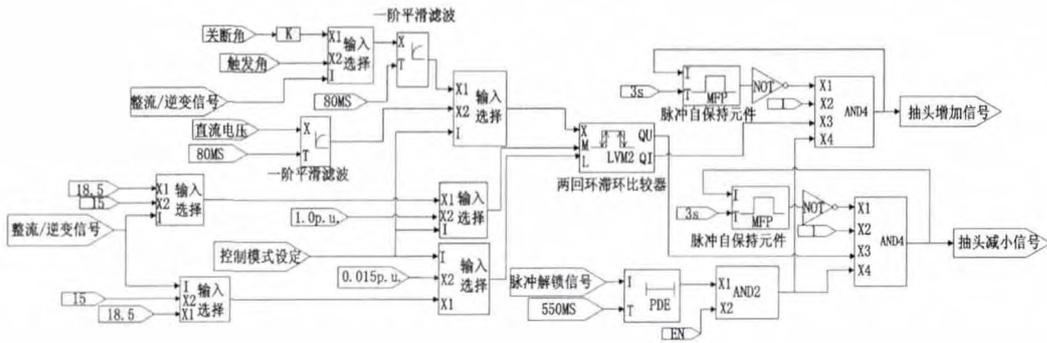


图1 分接头控制框图

制策略;在此基础上,将辅助控制应用到含 HVDC 的实际大电网进行混合仿真分析,验证了模型的有效性,分析了辅助控制模型对直流系统稳定性的影响,为交直流大电网运行特性的仿真研究提供参考。

1 辅助控制模型及控制策略

1.1 换流变压器分接头控制(TCC)建模

换流变压器分接头控制的基本控制原则是保持整流侧触发角、逆变侧熄弧角和直流电压运行在指定范围内^[14]。模型的主要结构见图1,可分为输入信号选择与处理、滞环比较控制、输出脉冲控制三个层级。

模型基本控制模式有两种,可手动切换。

1) 角度控制

整流侧分接头采用角度控制时,触发角 α 维持在指定范围内($15^\circ \pm 2.5^\circ$),以保证触发角留有可调范围的同时尽量提高换流器的功率因数;逆变侧分接头角度控制则保持一周期12个关断角中的最小值 γ_{min} 不超出指定范围($18^\circ \pm 2^\circ$)。

2) 电压控制

对于直流电压 U_d 的控制,当其偏离指定范围(0.98~1.02)且超过时滞时间时,分接头动作调节电压。

模型根据控制模式的设定选择输入信号,并通过一阶平滑器PT1滤除干扰信号。与经典分接头控制相比,模型控制参数的指定范围由自定义双回环滞环比较器LVM2确定,采用这种方法对控制量的上限和下限分别设定两个门槛值,从而避免了当测量值接近临界值时,测量值的误差信号使分接头控制误动作。模型考虑了分接头动作的时滞时间(3s),在时滞时间内控制量短时超出指定范围分接头不切换,主要目的是为了防止调节机构来回频繁

动作。

1.2 无功控制(RPC)建模

无功控制为滤波器投切控制模式之一,主要功能是通过投切交流滤波器组或电容器组实现交直流无功功率交换的平衡^[15-16]。换流站与交流系统的无功交换 Q_{sys} 可以表示为

$$Q_{sys} = Q_{dc} - Q_{filteract} \quad (1)$$

式中 Q_{dc} 为换流站吸收的无功; $Q_{filteract}$ 为投入运行的滤波器实际提供的无功。

直流系统运行状态发生变化时,无功控制就将换流站与交流系统间的无功交换限制在允许范围内。

实际上,交流电网随着全网负荷水平的不同而不断变化,投入运行的无功滤波器的出力也不是一成不变的,实际无功出力可由式(2)得到。

$$Q_{filteract} = (U_{ac}/U_{acN})^2 Q_{total} \quad (2)$$

式中 U_{ac} 为实际交流母线电压; U_{acN} 为无功设备设计时考虑的交流母线额定电压; Q_{total} 为当前状态下已投入总的无功补偿设备的额定容量。

通过运行人员工作站(QWS)可以确定当前运行点的理想不平衡无功 Q_{ac} 和允许不平衡无功 ΔQ ,换流器消耗功率由式(3)求出。

$$Q_{dc} = 2U_d I_d \frac{(\pi/180)\mu - \sin \mu \cos(2\alpha + \mu)}{\sin \mu \sin(2\alpha + \mu)} \quad (3)$$

式中 U_d 和 I_d 分别为直流电压和电流; α 为整流侧触发角; μ 为换相重叠角。当换流器位于逆变站时,用熄弧角替换式中的 α 。

当满足 $Q_{dc} - (U_{ac}/U_{acN})^2 Q_{total} + Q_{ac} \geq \Delta Q$ 时,发出无功补偿设备投入命令。

当满足 $(U_{ac}/U_{acN})^2 Q_{total} - Q_{ac} - Q_{dc} \geq \Delta Q$ 时,发出无功补偿设备切除命令。

为防止滤波器无功出力在投切控制临界点造成滤波器频繁投切,双回环滞环比较器对无功交换设

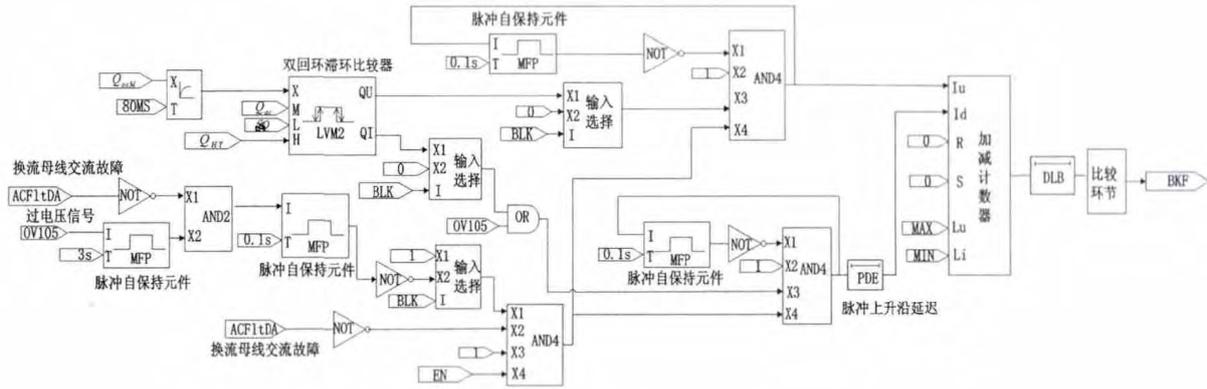


图2 无功控制框图

定上限和下限分别设置两个门槛值。模型主结构如图2所示。

考虑到交流母线电压在无功控制过程中的变化,模型设置电压限制投切功能,当电压达到“隔离”或者“跳闸”级别时,无论不平衡无功是否在指定范围内,都将自动分闸,直到只剩下最小滤波器,保证系统安全。此外,在换流母线发生交流短路故障时,无功控制功能将自动闭锁,以避免开关频繁误动。

1.3 TCC与RPC联合控制

基于ADPSS的特高压直流输电控制系统模型的基本控制方式是,整流侧由定电流控制和 α_{\min} 限制两部分组成,逆变侧配有定电流控制、定电压控制和定关断角 γ 控制,此外,整流侧和逆变侧都配有低压限流控制(VDCOL)。其稳态方程如下。

$$\begin{cases} U_{d1} = N_1(1.35U_1 \cos\alpha - \frac{3}{\pi}X_{r1}I_d) \\ U_{d2} = N_2(1.35U_2 \cos\gamma - \frac{3}{\pi}X_{r2}I_d) \\ I_d = \frac{1.35(U_1 \cos\alpha - U_2 \cos\gamma)}{R + 3/\pi(X_{r1} - X_{r2})} \end{cases} \quad (4)$$

式中, U_{d1} 和 U_{d2} 为整流站和逆变站的直流电压; U_1 和 U_2 为整流站和逆变站换流变压器阀侧空载线电压有效值; I_d 为直流电流; X_{r1} 和 X_{r2} 为整流站和逆变站每相的换相电抗; α 为整流器触发角; γ 为逆变侧关断角。

正常运行时,整流侧为定电流控制模式,逆变侧为定 γ 控制,一般直流换流器控制靠改变换流器的触发角来间接调节 I_d 和 γ 达到整定值(1~10ms)。

当直流电流整定值 I_{dref} 发生大幅改变时,由式(4)可知,若要在电流达到指令值的同时使得直流系统维持正常的换流器控制模式,需人为调整换流

变压器阀侧空载线电压值(U_1 、 U_2),通过改变换流变压器的变比 k 或换流母线的电压 U_{ac} 来调节直流的稳态运行特性,此类调整一般由改变换流变压器分接头档位和投切无功滤波器实现,且两种辅助控制之间相互影响^[17]。

换流器对于交流系统而言是一种无功负荷,其功率因数由式(5)确定。

$$\tan\Phi = \frac{(\pi/180)\mu - \sin\mu\cos(2\alpha + \mu)}{\sin\mu\sin(2\alpha + \mu)} \quad (5)$$

其中,换相重叠角

$$\mu = \cos^{-1} [U_d/U_{d0} - (X_c/\sqrt{2})(I_d/U_1)] - \alpha \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知,若调节换流变压器档位,阀侧电压 U_1 改变 μ 和 $\tan\Phi$ 的数值均会发生变化,从而影响换流器消耗的无功量,导致换流母线的电压 U_{ac} 和直流运行参数发生波动。反之,运行参数的改变又将影响分接头控制的输出,可能引起分接头位置的再次变化。因此分接头档位的调整和无功补偿装置的控制需要相互配合来确定最终的稳定运行状态。

TCC与RPC的联合控制策略如图3所示,将换流器的控制分为3个层次,第1层为直流系统换流器控制层,第2层为无功控制层,第3层为换流变压器分接头控制层。第2层与第3层的辅助控制之间的控制级别为:第2层优先,第3层次之。即直流系统运行参数发生改变时,首先控制无功补偿装置的投入使无功不平衡量和换流母线电压回到规定范围;然后调整换流变压器分接头,将 α 、 U_{d2} 等直流参数调节到正常值;由于直流参数的变化对于系统无功消耗存在影响,必要时,需重新改变无功补偿的投入,再次调整分接头。

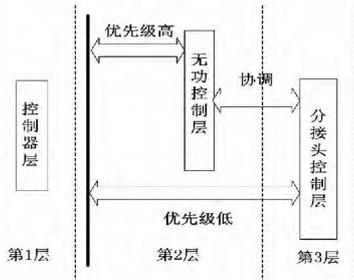


图3 联合控制策略

2 仿真分析

2.1 算例情况与仿真方案

仿真数据基于华中电网2014规划冬大方式,该数据中含有16 698个节点、8 686条交流线路、1 725台发电机和14条直流输电线路。其中哈密—郑州直流输电工程额定功率8 000 MW,额定电压 ± 800 kV,将成为中国输送容量最大、输送距离最远的特高压直流,其稳态运行特性成为影响华中电网安全稳定性的重要因素。

为精确模拟换流器、直流控制系统物理过程,同时保留大电网运行特性,对系统采取混合仿真。机电暂态接口位置选在与HVDC直接相连的交流母线,直流部分划分到电磁子网,交流系统划分到机电子网。辅助控制模型通过自定义模块(UDM)的“接口变量”与仿真主系统连接,实现模型在主系统中的“安装”及调用。辅助控制的配置如下:整流侧换流变压器分接头采用角度控制,逆变侧采用电压控制;送端换流站位于电厂附近,可利用交流系统的部分无功源,因此只考虑逆变侧的无功控制以维系该侧换流母线电压。

2.2 辅助控制的动作特性及机理分析

考虑运行状态I:直流系统自5 s开始进入持续时间为2 h的短期过负荷状态。辅助控制的动作过程及对直流运行参数的影响如图4和图5所示。

由图4和图5可知,直流功率提升后,所建的无功控制自定义模块能够正确响应,投入13组无功补偿装置,为直流系统提供无功支撑。此时换流站其他运行参数(直流电压、触发角等)存在越界的现象,两侧换流变压器分接头控制自定义模块同时发出动作指令,分接头档位分别降低至-3和-2,从而提高两端换流变压器阀侧绕组电压,使得触发角

回升至 14° ,直流电压稳定在0.99 p. u.。分接头调整过程中,逆变侧空载直流电压的增大导致换流站无功需求增加,因此在逆变侧换流变压器分接头第二次动作时,无功控制模块根据新的档位对无功补偿进行调整,增加投入1组无功补偿装置,使不平衡无功重新达到规定范围。调整后,逆变侧直流电压仍控制在理想范围内,换流变压器分接头不需要再次动作。

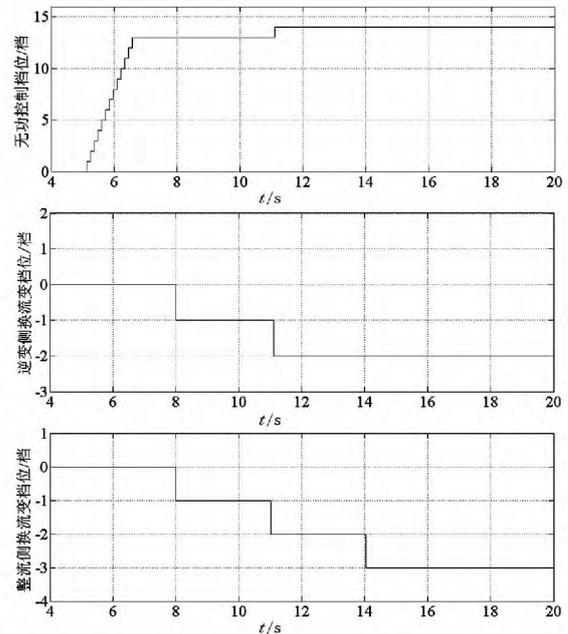


图4 直流过负荷期间辅助控制的动作

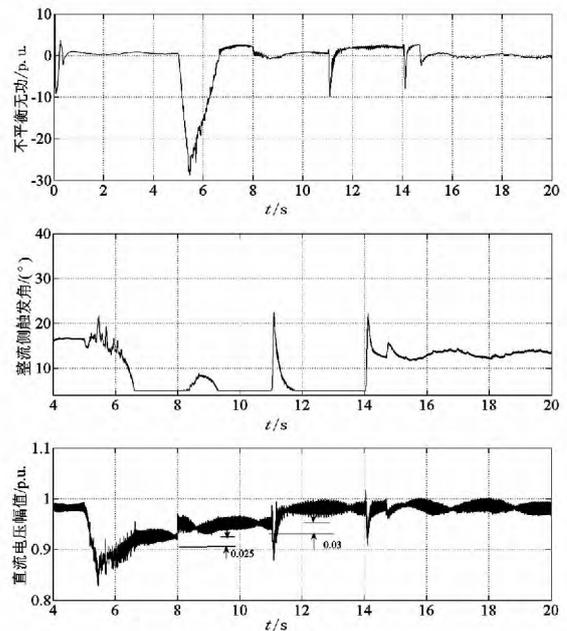


图5 辅助控制对直流运行参数的影响

2.3 辅助控制的影响分析

表1对比了无辅助控制与投入辅助控制两种情

况下的直流稳态运行参数。

表1 不同控制策略下直流稳态参数

控制	U_d /p.u.	I_d /p.u.	α (°)	Q_{ac} /p.u.	p_{ac} /p.u.
1	0.83	48	22	33	0.90
2	0.98	48	14	0.50	0.99

注:控制1为无辅助控制;控制2为投入辅助控制。

可以看到,在直流过负荷的运行方式下,投入TCC与RPC的联合控制,在维持直流系统逆变侧无功平衡和换流母线电压稳定方面效果显著,同时换流站运行参数被控制到指定范围内,直流系统的稳态运行性能得到大大改善。

在运行状态I的基础上假设故障:逆变站交流母线“豫郑州换”母线三相短路接地,接地电阻为60Ω,开始时间为20s,结束时间为20.1s。比较表1两种情况下的逆变侧阀电流波形,如图6所示。

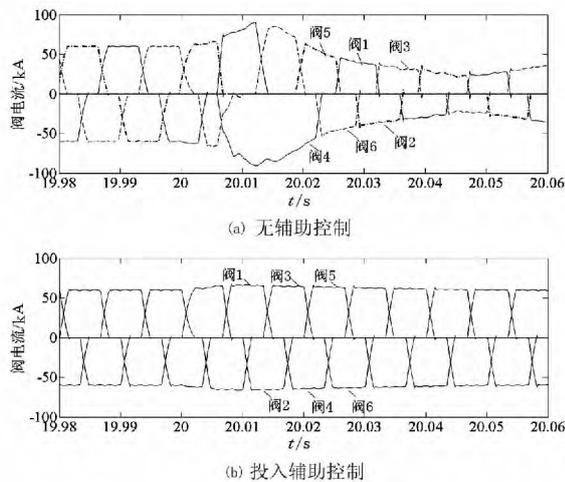


图6 两种控制模型下逆变侧阀电流波形

由图6的阀电流波形可以看到,辅助控制的投入避免了故障期间“换相失败”现象的发生。这是因为:在直流过负荷的运行方式下,TCC与RPC的联合控制提高了逆变器的换相电压,增大稳态时的关断余裕角,从而减少“换相失败”发生的风险,使得直流系统对交流系统故障导致的“换相失败”承受能力更强。

3 结论

(1) 利用ADPSS用户自定义功能建立的包括换流变压器分接头控制和换流站无功控制的直流辅助控制模型能够正确响应直流系统运行状态的变化,适用于实际大区电网的混合仿真分析。

(2) 考虑直流换流器参数与换流站无功调整之间的交互影响,模型对分接头调整和无功补偿装置

投切之间采用联合控制,从而达到维持换流站无功平衡和保证直流理想运行参数的双重控制目标。

3) 与ADPSS原有直流输电模型相比,辅助控制模型的投入对改善直流稳态运行性能效果显著,有效减少“换相失败”的风险,有利于维持直流输电系统的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 吴宝英,陈允鹏,陈旭,等. ±800 kV云广直流输电工程对南方电网安全稳定的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 5-12.
- [2] 毛晓明,管霖,张尧,等. 含有多馈入直流的交直流混合电网高压直流建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 72-77.
- [3] 汪隆君,王钢,李海锋,等. 交流系统故障诱发多直流馈入系统换相失败风险评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 9-14.
- [4] 周俊,郭剑波,胡涛,等. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 221-228.
- [5] 徐政,蔡晔,刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 4-8.
- [6] 李秋硕,张剑,肖湘宁,等. 基于RTDS的机电电磁暂态混合实时仿真及其在FACTS中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 219-226.
- [7] 刘文焯,汤涌,万磊,等. 大电网特高压直流系统建模与仿真技术[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 1-3.
- [8] 于占勋,朱倩茹,赵成勇,等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(一)含直流馈入的山东电网EMTDC建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 58-64.
- [9] 龙霏,蔡泽祥,李晓华,等. 含多馈入直流的广东电网EMTDC仿真建模[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 53-57.
- [10] 慈文斌,刘晓明,刘玉田. ±660 kV银东直流换相失败仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 134-139.
- [11] 岳程燕,田芳,周孝信,等. 电力系统电磁暂态-机电暂态混合仿真的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 1-5.
- [12] 田芳,李亚楼,周孝信,等. 电力系统全数字实时仿真装置[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 17-22.
- [13] 朱旭凯,周孝信,田芳,等. 基于电力系统全数字实时仿真装置的大电网机电暂态-电磁暂态混合仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 26-31.
- [14] 王峰,徐政,黄莹,等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
- [15] 张啸虎,曹国云,陈陈. 高压直流系统低功率运行时

的无功控制策略[J]. 电网技术 2012 36(1): 118 - 122.

[16] 张望 郝俊芳 曹森 等. 直流输电换流站无功功率控制功能设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 72 - 76.

[17] 刘崇茹 张伯明. 考虑换流变压器和无功补偿协调控制计算 AC/DC 系统有功 - 电压曲线[J]. 电力自动

化设备 2009 29(1): 50 - 53.

作者简介:

朱 玲(1990), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定与控制;

王 骅(1973), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真。

(收稿日期: 2013 - 06 - 14)

(上接第 32 页)

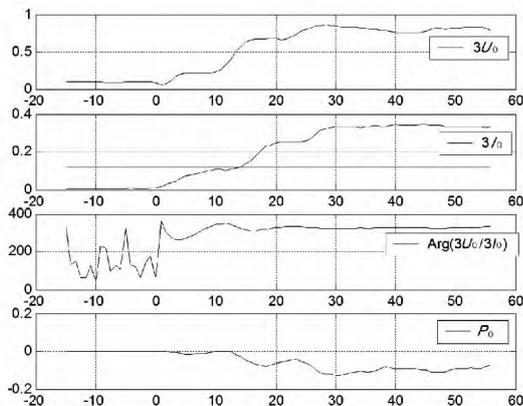


图 15 乌岗 II 线乌北侧零序功率情况

4 结 论

通过分析可知: 乌岗 II 线乌北侧纵联距离元件动作; 龙岗侧纵联零序功率判为正方向。从高频保护逻辑来看, 两侧保护有可能出现不正确动作

在区外不接地对称故障中, 系统中出现零序分量, 导致乌岗 II 回线保护感受到零序电压和零序电流, 从而造成保护装置出现上述的动作特性。

结合理论分析、仿真计算和离线模拟分析, 在实际电网运行的经验基础上, 给出以下建议。

(1) 对系统不平衡程度进行判别, 当不平衡程度较弱时, 闭锁纵联零序正方向或者延时投入纵联零序正方向。

方案优点: 常规区内故障能可靠快速动作; 能有效防止线路不换位时区外故障出现零序分量导致保护误动;

方案缺点: 重负荷高阻接地故障时, 纵联零序动作速度受到影响(此时系统电压下降不多, 对系统稳定影响不大)。

(2) 考虑利用高阻投入抑制零序电流。但此方案需在以下几方面进行进一步研究, 以保障高阻投入的正确性。

1) 零序功率方向元件投入需要确定是高阻情况才投入;

2) 研究如何区别高阻接地与不平衡零序电流;

3) 对方向元件进行研究, 确保各种条件下, 反方向故障时不启动发信。

参考文献

[1] 孙国凯. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2002: 137 - 142.

[2] 贺家李. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1994: 87 - 91.

[3] 王瑞敏. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 北京农业出版社, 1994: 25 - 32.

[4] 刘杨, 李晓明, 曹凯丽. 220 kV 系统高频保护异常运行分析及预防措施 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(5): 98 - 101.

[5] 苏斌, 董新洲, 阿德南, 等. 方向高频保护的动作为第二部分: 复故障情况下方向高频保护的动作为分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003(2): 9 - 13.

[6] 康小宁, 梁振锋. 同杆平行双回线路保护及自动重合闸综述 [J]. 继电器, 2004, 31(23): 72 - 76.

[7] 王红光. 影响高频保护正常投入的原因分析及对策 [J]. 继电器, 2000, 28(11):

[8] 汤大海, 周立刚. 区外母线故障高频保护动作为分析 [J]. 江办电机工程, 1995(4): 13 - 16.

[9] 景胜. 河南电网高频保护不正确动作原因分析与建议 [J]. 继电器, 2003, 31(3): 76 - 78.

[10] 高智勇. 高频保护误动原因分析及改进措施 [J]. 四川电力技术, 2002(S1): 33, 37.

作者简介:

梁 静(1963), 女, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护分析方面的研究;

赵青春(1980), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护分析方面的研究;

胡立锦(1983), 男, 硕士研究生, 主要从事电网运行控制方面的工作。

(收稿日期: 2013 - 07 - 08)