

# 某真实连锁故障下自动电压调节器的调节特性 仿真分析与评估

梁浩<sup>1</sup>, 谢欢<sup>1</sup>, 吴涛<sup>1</sup>, 张广韬<sup>1</sup>, 訾鹏<sup>2</sup>, 张饶<sup>3</sup>, 苏为民<sup>1</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045; 2. 国家电网公司华北分部, 北京 100010;  
3. 三峡大学 电气工程及其自动化系, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:**励磁控制系统在连锁故障下改善系统大干扰后的暂态过程、防止电压失稳等方面意义重大。首先介绍了自动电压调节器(AVR)中定子电流限制环节的相关原理与仿真模型;然后分析了一起现场真实连锁故障对周边某机组的影响及其AVR的响应过程,包括多次强励、定子电流限制动作、机端电压过低引起失稳等;最后利用RTDS软件搭建了单机无穷大一次仿真系统及AVR的主、辅控制环节,通过外部故障模拟与AVR调节特性仿真,重点分析了AVR定子电流限制环节及严重故障下发电机自并励励磁方式的特性并提出优化建议。

**关键词:**连锁故障;自动电压调节器;实时数字仿真;电压稳定;定子电流限制

**中图分类号:**TM 761

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202102013

## 0 引言

近些年来,国内外发生了多起电力系统单一故障引发连锁故障导致大停电事故的案例,对设备本身安全和电网稳定运行造成严重危害,导致了重大的经济损失<sup>[1-5]</sup>。对这些事故的起因、动态发展过程、干预处理等进行分析与总结,从中吸取经验和教训,可有效避免类似事件的发生。

随着主流自动电压调节器(AVR)厂家产品性能、控制逻辑不断完善以及电力系统稳定器的推广与应用,励磁控制系统在提高机组与电网安全稳定运行、提升断面功率送出极限等方面的作用愈加突出<sup>[6-9]</sup>。对众多国内外电网故障事例进行研究后发现,励磁控制系统在事故中改善系统受到大干扰后的暂态过程、防止电压失稳等方面也有重要作用<sup>[10-14]</sup>。

2016年某地区330 kV变电站因电缆沟道井口爆炸导致站内多台主变相继起火,最终导致站内6回330 kV出线陆续跳闸,整个过程超过2 min。受该连锁故障冲击,周边共5台发电机组相继跳机停运,其中部分机组在故障过程后期仍并网运行,励磁系统持续提供强励支撑、辅助限制正确动作,对故障下的电网稳定意义重大。周边某300 MW机组的发变组故障录波器装置记录下了上述整个连锁故障过程中该发电机励磁控制系统的调节特性,涉及多次强励、

定子电流限制(SCL)动作特性、SCL二次强励判据触发、机端电压过低引起失稳失步、保护动作跳机等。

本文首先对发电机定子绕组过流能力相关要求以及励磁控制系统SCL环节动作原理与仿真建模进行介绍,然后对上述事件中受影响机组动态调节过程的录波数据进行提取分析。通过RTDS仿真复现了该机组故障下AVR的整个动态调节过程,同时研究了严重故障下的电压稳定问题并提出优化建议。

## 1 AVR的SCL功能介绍与仿真建模

### 1.1 SCL功能介绍

(1)发电机定子过流能力要求。

在发电机强励过程中,定、转子绕组均会出现短时过电流现象。目前相关标准已经对电机定、转子短时过电流能力作出了明确的规定,如GB/T 7064—2017《隐极同步发电机技术要求》规定:对于定子过电流,额定容量在1 200 MV·A及以下的电机,应能承受1.5倍的额定定子电流历时30 s而无损伤,并且允许过电流时间与过电流倍数见式(1)。

$$(I^2 - 1)t = 37.5 \quad (1)$$

其中, $I$ 为定子电流标幺值; $t$ 为持续时间,适用范围为10~60 s。

(2)AVR的SCL环节介绍。

虽然目前AVR中的SCL存在争议,但其在电力系统中已获得广泛应用。尽管SCL的设计初衷只是针对发电机运行到超出额定有功功率的情况,但若系统发生故障,只要定子电流超过启动值而励磁电流不超过或过励限制未动作,SCL将成为主控制,在过励运行状态下减少励磁及无功功率输出,使定子电流回到限制定值边界以内<sup>[15]</sup>。

国内外主流AVR厂家的方案是考虑式(1)中定子电流的过载能力曲线,设计过流反时限特性,即过

收稿日期:2020-05-06;修回日期:2020-12-15

基金项目:国家电网公司华北分部科技项目(特高压交直流联合外送的弱送源协调机理研究项目)(520101180050)

Project supported by the Science and Technology Project of North China Branch of State Grid Corporation of China (Research on Network Source Coordination Mechanism of Weak Sending End of UHV AC/DC Combined External Transmission System)(520101180050)

载越重,允许的时间越短。SCL中的反时限曲线定值应根据发变组定子过负荷保护定值进行整定,而过负荷保护定值则根据式(1)进行整定。整定原则为:相同过流倍数下,SCL反时限时间<定子过负荷保护动作时间<标准规定的定子允许过流时间<sup>[16]</sup>。SCL反时限时间整定得过长,会导致定子过负荷保护动作进而停机;整定得过短,则SCL会提早动作,无法发挥机组的强励潜能。

当定子电流过流时间超过反时限曲线对应时间时,AVR由机端电压主环控制切换或叠加以定子电流闭环的SCL环节,来防止机组运行在标准规定的定子过流能力之外。不同厂家的模型尽管在具体实现上存在差异,如动作模型输出采用叠加方式或者竞比门方式、控制模型采用比例积分环节或超前滞后环节等,但总体控制方式接近。

## 1.2 励磁厂家基于此次事件的SCL模型仿真建模

### 1.2.1 SCL反时限计算

SCL反时限计算公式为:

$$T = \frac{(I_0/I_{th})^2 - 1}{(I_1/I_{th})^2 - 1} T_0 \quad (2)$$

其中, $T$ 为当前定子电流 $I_1$ 下允许的反时限时间值; $I_0$ 、 $T_0$ 分别为装置内部设定的定子电流定值和反时限时间定值; $I_{th}$ 为长期允许电流值。如:设 $I_0=1.6$  p.u., $T_0=15$  s, $I_{th}=1.05$  p.u.,则当 $I_1=1.4$  p.u.时,经过 $T=25.5$  s后,SCL环节动作。

### 1.2.2 SCL计时仿真模型

图1为根据厂家程序中SCL计时原理搭建的仿真模型。图中, $T_R$ 为定子电流测量时间常数; $K_{expSCL}$ 为指数参数,一般取2; $K_{invSCL}$ 为定子电流热积累反时限计算系数,由 $I_0$ 、 $T_0$ 和 $I_{th}$ 计算得到; $K_{0SCL}$ 、 $K_{cSCL}$ 分别为热积累、散热定时限计算系数; $U_i$ 为机端电压; $S_{SCL0}$ 为反时限计时判据; $S_{SCL1}$ 为SCL动作判据。

图1上部分为计时逻辑,热积累计算过程采用反时限计时模型,散热过程采用定时限计时模型,输入为 $I_1$ ,输出为 $S_{SCL0}$ 。当 $I_1/I_{th}>1$ 时,该环节开始模拟定子电流热积累积分计算, $S_{SCL0}$ 从0逐渐变大,当 $S_{SCL0}=1$ 时SCL达到热积累时间定值;当 $I_1/I_{th}<1$ 时,

该环节模拟散热积分计算, $S_{SCL0}$ 从1逐渐变小,当 $S_{SCL0}=0$ 时SCL达到散热时间定值。

图1下部分为二次强励逻辑,在SCL动作后的散热过程中,满足机端低电压判据时及时从SCL环节切换到主环控制进行强励,输入为 $S_{SCL0}$ ,输出为 $S_{SCL1}$ 。具体逻辑如下:正常情况下,机组强励, $I_1/I_{th}>1$ ,反时限时间达到最大允许值时, $S_{SCL0}$ 由0变为1,同时 $S_{SCL1}$ 由0变为1,AVR切换为SCL环节控制进行减磁控制;当 $I_1/I_{th}<1$ 时,SCL进行散热时间计算直至 $S_{SCL1}$ 由1变为0(散热过程中 $S_{SCL0}$ 由1逐渐减小, $S_{SCL1}$ 保持为1)。但如果SCL动作期间( $S_{SCL1}=1,0.01<S_{SCL0}<1$ ),电网再次发生故障导致机端电压快速跌落使得 $dU_i/dt>5$  p.u.,根据逻辑 $S_{SCL1}$ 由1变为0,即使SCL散热计时未结束( $S_{SCL0}>0.01$ ),励磁系统也会由SCL环节切换回AVR主环控制进行强励增磁控制。

部分主流厂家一般只设计了计时逻辑部分,不包含二次强励逻辑部分, $S_{SCL0}$ 变为SCL动作判据。这样,当机组强励满足热积累反时限定值时, $S_{SCL0}=1$ ,SCL正确动作;当定子电流降低到散热时间定值时, $S_{SCL0}=0$ ,SCL正确退出。但是在SCL环节进行散热时间计算的过程中( $S_{SCL0}$ 由1变为0),励磁系统一直维持SCL闭环控制,发生外部故障时无法发挥机组潜能进行强励。

### 1.2.3 SCL动作仿真模型

图2为根据厂家程序中SCL动作原理搭建的仿真模型。图中, $K_S$ 为AVR主环比例增益; $I_{max}$ 为定子电流最大限制值; $K_{S1}$ 为SCL环节比例增益; $U_{SCLind}$ 为SCL环节输出值; $U_{ERR}$ 为主环偏差值;LV为低通门;

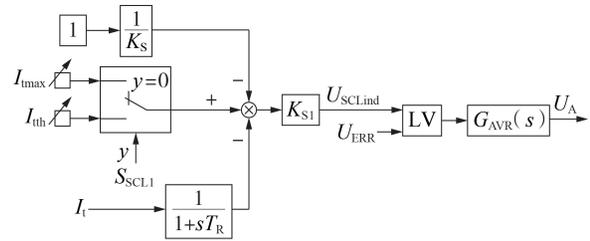


图2 事件中AVR采用的SCL动作模型

Fig.2 SCL action model of AVR in above event

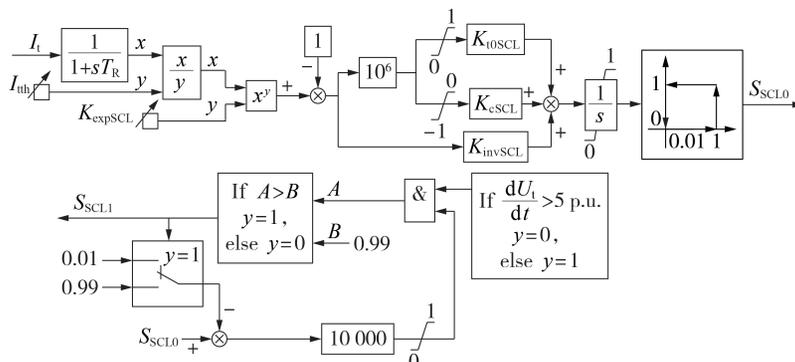


图1 事件中AVR采用的SCL计时模型

Fig.1 SCL timing model of AVR in above event

$G_{AVR}(s)$ 为励磁系统传递函数; $U_A$ 为励磁系统输出值。

正常运行工况下, $S_{SCL1}=0, I_{lmax} \gg I_l, U_{ERR} < U_{SCLind}$ , 机组由AVR主环控制;当机组强励后SCL环节达到热积累时间定值时, $S_{SCL1}=1, I_l > I_{th}, U_{ERR} > U_{SCLind}$ , 机组切换为SCL环节控制。

## 2 连锁故障下AVR动态响应过程介绍

### 2.1 故障前电厂运行工况

该电厂共有2台机组,均为自并励方式,在故障发生之前,1号发电机经主变并网运行,2号发电机为停机状态。在故障录波器启动录波之前,1号发电机有功功率约为296 MW,无功功率约为190 Mvar,机端电压约为20.62 kV,定子电流约为10 kA,励磁电压约为460 V,励磁电流约为2 168 A,机组处于接近满有功、满无功运行。上述数据均从发变组故障录波器读取,与实际值可能略有偏差。

由此可推断,1号发电机之前已经因为外部故障进行过强励支撑,才导致无功功率接近额定,只是没有触发判据启动故障录波器。

### 2.2 外部连锁故障对电厂的影响

第一阶段,在00:27:46.764时刻,主变高压侧电压采集到第一次故障:由B相电压跌落(三相电压200.9 kV / 180.0 kV / 198.0 kV,后同)→BC相电压跌落(193.8 kV / 174.9 kV / 178.1 kV)→ABC相电压跌落(174.5 kV / 174.1 kV / 174.0 kV),在00:27:47.959时刻结束,故障过程持续时间约为1.2 s。图3为本阶段主变高压侧电压 $U_s$ 和机端电压 $U_l$ 的变化曲线。

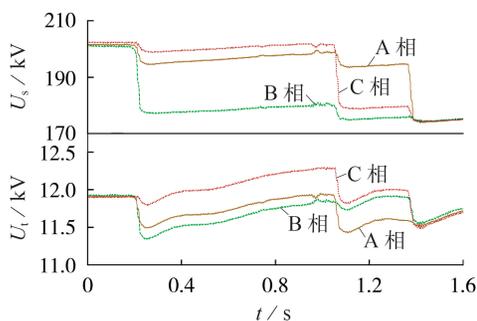


图3 第一次故障下 $U_s$ 和 $U_l$ 的变化曲线

Fig.3 Curves of  $U_s$  and  $U_l$  under first fault

第二阶段,在00:29:32.699时刻,在第一次故障结束后约105 s,主变高压侧采集到第二次故障:由BC相电压跌落(162.2 kV / 89.5 kV / 90.3 kV)→ABC相电压跌落(39.5 kV / 42.4 kV / 44.0 kV),故障过程持续时间约为0.12 s。图4为第二次故障下机端电压 $U_l$ 和励磁电压 $U_f$ 的变化曲线。

### 2.3 AVR动态响应调节过程分析

(1)由图3可见,第一次故障下,主变高压侧三相电压相继跌落造成了发电机机端电压下降,AVR正确响应,连续强励支撑,故障结束后机端ABC

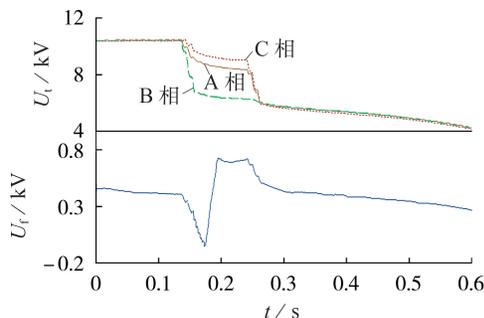


图4 第二次故障下 $U_l$ 和 $U_f$ 的变化曲线

Fig.4 Curves of  $U_l$  and  $U_f$  under second fault

三相电压稳定在11.77 kV / 11.74 kV / 11.73 kV,机端线电压平均值约为20.345 kV(以20 kV为基准即为1.02 p.u.,后同)。

原始故障录波数据显示,上述强励过程中,励磁电流不断升高,在00:27:54.493时刻升至最高(约1.64 p.u.),定子电流升至最高(约1.67 p.u.)。在本次故障下,为了维持机端电压平衡并为电网提供无功支撑,机组过载运行,无功功率已超过490 Mvar,为后续励磁辅助限制动作埋下伏笔。

(2)第一次故障后约9 s,分别在00:27:55.801、00:27:55.889时刻(此时还未发生第二次故障),故障录波器显示收到AVR发来的“定子过负荷”和“励磁回路过负荷”动作信号,AVR进行减磁,机端电压降至约0.88 p.u.,励磁电流限制在约0.84 p.u.,定子电流限制在约1.05 p.u.,无功功率约150 Mvar。

考虑到这2个动作信号时间相差不到0.1 s,结合辅助限制动作前后励磁电流与定子电流数值大小以及对该型号AVR的现场调试经验,可以认为,AVR实际只有定子电流限制动作,而过励限制此时未动作。与该励磁厂家确认,“定子过负荷”信号为该型号AVR的“定子电流限制”功能;“励磁回路过负荷”信号为该型号AVR的“过励动作”功能,定子电流限制、过励限制或V / Hz限制动作后均可发出。

(3)由图4可见,定子电流限制动作后约97 s,即第二次故障发生时刻,根据录波数据分析,机端ABC三相电压从10.4 kV / 10.3 kV / 10.3 kV跌落至8.3 kV / 6.2 kV / 8.9 kV后继续下降至5.9 kV / 5.9 kV / 5.9 kV,然后持续下降;而励磁电压先迅速下降,然后迅速上升,随后与机端电压一同缓慢下降。最终因机端电压过低超过了静稳极限,有功功率正负摆动,出现类似滑行失步现象。

## 3 仿真模型搭建与励磁调节特性复现

### 3.1 仿真系统建模与测试

利用RTDS软件搭建单机无穷大一次仿真系统,其中发电机模型参数选用该电厂机组真实参数。根据该机组选用的AVR厂家型号,在RTDS中完成

了AVR电压主环以及相关辅助限制环节的建模和参数设定,构成闭环仿真测试系统并进行相关测试。

附录中图A1为该型号AVR设备在入网检测时空载5%阶跃试验波形对比,其中黑色曲线表示实际装置,红色曲线表示RTDS仿真模型。测试结果显示机端电压与励磁电压波形基本拟合,说明本次仿真模型中AVR的动态响应特性与控制参数满足仿真分析要求。

### 3.2 外部连锁故障仿真拟合

在RTDS仿真系统中模拟主变高压侧接地故障,通过设置不同的接地电阻值与故障时间拟合现场第一次故障对电厂的影响,如附录中图A2所示。对比图A2与图3中不同故障时刻高压侧三相电压可知,各故障阶段三相电压基本一致,本次搭建的仿真系统可复现出真实电网复杂连锁故障。

在模拟相同连锁故障下,仿真系统AVR的调节特性与现场装置基本一致,机端电压维持在约1 p.u.,励磁电压与无功功率持续增加。

### 3.3 AVR中SCL环节动作特性仿真拟合

仿真系统成功复现出2次外部连锁故障之间SCL的动作情况,如图5所示。图中,机端线电压三相平均值 $\bar{U}_t$ 、 $I_t$ 、 $U_t$ 均为标幺值,后同。仿真结果与现场实测数据对比如表1所示。由表可见,仿真系统中SCL的调节特性与现场实际情况基本一致。同时,对比图5与2.3节数据可知,机端电压与无功功率 $Q$ 也基本与现场拟合。

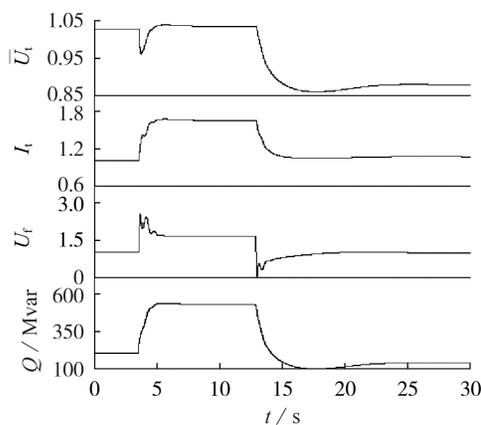


图5 2次外部故障之间SCL动作特性仿真曲线

Fig.5 Simulative curves of SCL action characteristic between two external faults

表1 现场与仿真下SCL动作过程数据对比

Table 1 Data comparison of SCL action process in field and simulation

情形	$I_t$			SCL动作 时间/s	$I_t$ 调节 时间/s
	初始	强励后	SCL动作后		
现场录波	0.99	1.64	1.07	9.0	3.0
RTDS仿真	1.00	1.65	1.07	9.2	2.9

### 3.4 第二次故障下AVR调节特性仿真拟合

仿真系统模拟了第二次实际连锁故障,记录下励磁调节器在SCL动作后的响应过程,如图6所示。

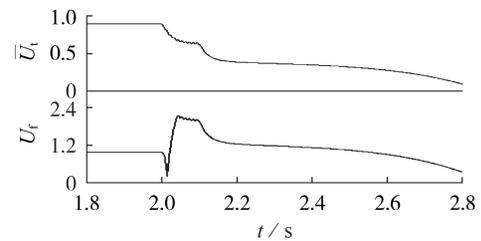


图6 第二次故障下 $\bar{U}_t$ 和 $U_f$ 变化的仿真曲线

Fig.6 Simulative curves of  $\bar{U}_t$  and  $U_f$  under second fault

对比图6与图4可知,在第二次故障下,仿真系统的AVR动态响应过程与真实情况基本一致。真实情况下, $\bar{U}_t$ 从0.89 p.u.→0.67 p.u.→0.51 p.u.,然后缓慢下降;仿真情况下, $\bar{U}_t$ 从0.89 p.u.→0.65 p.u.→0.48 p.u.,同样缓慢下降。真实情况下,励磁电压先从0.86 p.u.迅速下降至-0.1 p.u.然后迅速上升至1.56 p.u.,随后缓慢下降;仿真情况下,励磁电压同样先从0.93 p.u.迅速下降至0.2 p.u.然后迅速上升至1.89 p.u.,随后同样缓慢下降。

## 4 AVR调节特性分析与性能优化

### 4.1 SCL动作过程分析

通过对现场录波数据分析以及仿真拟合可知,SCL动作定值很可能采用厂家默认值,即1.6 p.u.过流倍数下允许运行10 s。而一般现场主流定子过负荷保护定值在1.6 p.u.,反时限时间约为21 s。这样就造成了SCL过早动作,未充分发挥机组在电网故障下的无功支撑作用。因此,建议该电厂根据实际情况核实SCL定值,并结合定子过负荷保护定值修改,如可按照式(2)设置装置中 $I_{10}=1.6$  p.u., $T_0=18$  s,则可使得SCL既能充分发挥励磁系统的强励能力,又能保证定子过负荷保护晚于SCL动作。

但同时也要看到,本机组在发生电网严重故障后AVR正确响应进行多次强励,以过载为代价提升电网电压持续近10 s,而且SCL动态调节效果良好,动作后机端电压与有功功率平稳,机组继续稳定运行。相比周边部分机组受到大扰动后直接跳机而言,该机组已为本次连锁故障作出较大贡献。

### 4.2 第二次故障下AVR调节特性分析

如图2所示,该型号AVR的SCL环节以低通门形式接入电压控制主环,且SCL动作后返回逻辑为定时限散热,即稳定后的定子电流小于返回值持续100 s后自动从SCL环节切换回主环控制。根据现场实录数据可知,第二次故障发生在SCL动作后约97 s,可认为此时AVR应该仍是SCL环节闭环控制。

这样也可以解释为什么在发生第二次故障时励

磁电压先下降而非上升:因为发生故障时机端电压下降,定子电流上升,SCL环节是以闭环控制定子电流至返回值(如1.05 p.u.)为目标,定子电流上升后SCL会发出减磁指令以达到将定子电流减小至返回值的目。而如果是主环控制,故障时机端电压下降,AVR应发出增磁指令以达到提升机端电压的目的,励磁电压应该先呈现上升趋势。

随后,实录数据显示励磁电压迅速上升但很快又呈现下降趋势。经与厂家确认,SCL环节具有二次强励功能,即满足机端电压跌落判据后,SCL环节切换为主环控制,此时机端电压低于电压给定值,AVR进行强励,励磁电压升高,见图7中的 $U_f$ 仿真波形。但是由于本机组为自并励励磁系统,机端电压过低会导致为励磁系统提供的阳极电压偏低,而且考虑到此时励磁电流过高引起的换向压降,造成了励磁系统无法提供更大的强励支撑,即AVR输出上限随机端电压下降而变小,最终加快机端电压下降趋势造成滑行失稳,见图7中励磁电压上限 $U_{fmax}$ 仿真波形。图中, $U_{fmax}$ 为标么值,以空载励磁电压值为基准。

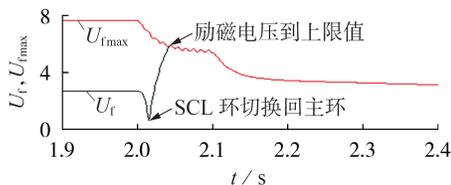


图7 第二次故障下 $U_f$ 和 $U_{fmax}$ 的仿真曲线

Fig.7 Simulative curves of  $U_f$  and  $U_{fmax}$  under second fault

#### 4.3 第二次故障下AVR调节特性的优化与探索

考虑到第二次故障中电压失稳与AVR输出上限因机端电压过低受限有关,在仿真系统中放开自并励方式励磁电压输出上限,由原来受机端电压与励磁电流影响改为固定的强励最大值以模拟他励励磁方式,重复上述仿真。图8为修改励磁方式后,第二次故障下 $\bar{U}_1$ 、 $U_f$ 、有功功率 $P$ 的仿真对比曲线。可见切换回主环控制后,他励方式下励磁系统不受机

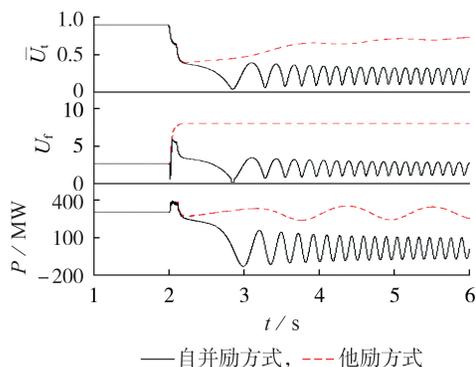


图8 修改励磁方式后第二次故障下机组电气量仿真曲线

Fig.8 Simulative curves of generator electrical quantities under second fault after modifying exciting mode

端电压跌落影响,可继续提供更大的强励支撑,避免了第二次连锁故障下的失稳问题。

如果在这2次连锁故障冲击中,部分提前脱网机组励磁系统能够正确响应进行强励支撑或者个别机组采用他励励磁方式,对本台机组的冲击就会减小。仿真系统通过改变第二次故障的严重程度(机端电压跌落减小0.1 p.u.)模拟上述工况。

附录中图A3为修改故障严重程度后,第二次故障下 $\bar{U}_1$ 、 $U_f$ 和 $P$ 的仿真对比曲线。可见故障减轻后,本次工况下即使本台机组是自并励方式,也可以避免电压失稳,进行二次强励,为电网提供短时支撑。

## 5 结论

本文介绍了励磁系统SCL环节相关原理与仿真模型,针对一起现场真实连锁故障过程中周边某机组的励磁控制系统响应过程,基于实际录波数据分析了外部故障对机组的影响以及在故障中AVR的调节特性。用RTDS软件搭建了单机无穷大系统以及AVR的主、辅控制环节,通过故障模拟与仿真复现,得到如下结论。

(1)AVR中过励限制、SCL定值要根据现场情况正确整定,既要分别与其对应的发变组保护配合正确,又要在保证机组安全的前提下,尽量充分发挥励磁系统强励支撑能力。

(2)对于过励限制与SCL,建议具备散热逻辑和二次强励功能,即在限制动作后满足条件时可进行散热计时以及主、辅控制环节切换;当限制动作后再次发生外部短路故障满足判据时,能及时切换回主环控制,提供强励支撑。

(3)目前新建机组绝大多数为自并励励磁系统,考虑到自并励系统严重故障下机端电压过低引起强励支撑能力不足,建议在特殊地区进行电网规划时,如特高压受端电网,可考虑接入部分他励励磁系统或采取其他强励手段,以应对类似事故情况,提高严重故障下电网的稳定性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 石立宝,史中英,姚良忠,等. 现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J]. 电网技术,2010,34(3):48-54.  
SHI Libao, SHI Zhongying, YAO Liangzhong, et al. A review of mechanism of large cascading failure blackouts of modern power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 48-54.
- [2] 林伟芳,汤涌,孙华东,等. 巴西“2.4”大停电事故及对电网安全稳定运行的启示[J]. 电力系统自动化,2011,35(9):1-8.  
LIN Weifang, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Blackout in Brazil power grid on February 4, 2011 and inspirations for stable operation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 1-8.
- [3] 李继红,戴彦,王超,等. 大电网连锁故障的风险分析及对策[J]. 电网技术,2011,35(12):43-49.  
LI Jihong, DAI Yan, WANG Chao, et al. Risk analysis and coun-

- termeasures to prevent cascading failures in large-scale power grids[J]. Power System Technology, 2011, 35(12):43-49.
- [4] 印永华, 郭剑波, 赵建军. 美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10):8-11, 16. YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America Power Grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10):8-11, 16.
- [5] 甘德强, 胡江溢, 韩祯祥. 2003年国际若干停电事故思考[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3):1-5. GAN Deqiang, HU Yijiang, HAN Zhenxiang. After the 2003 blackouts across several continents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3):1-5.
- [6] 吴龙. 发电机励磁设备及运行维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019:162-168.
- [7] 赵晓伟, 谢欢, 吕思昕, 等. 电力系统稳定器PSS4B的参数整定及现场试验[J]. 电网技术, 2016, 40(2):508-513. ZHAO Xiaowei, XIE Huan, LÜ Sixin, et al. Parameter setting and on-site test of power system stabilizer-PSS4B[J]. Power System Technology, 2016, 40(2):508-513.
- [8] 姜晓弋, 吴希再. 基于非线性最优和PID技术的综合励磁调节器研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(9):15-17. JIANG Xiaoyi, WU Xizai. Excitation controller based on combination of non-linear optimal and PID controls[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(9):15-17.
- [9] 李啸聪, 陈登义. 发电机励磁与SVC的改进自适应反步无源协调控制[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12):73-78. LI Xiaocong, CHEN Dengyi. Improved adaptive backstepping passive coordinated control for generator excitation and SVC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12):73-78.
- [10] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计及运用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002:232-233.
- [11] 程启明, 程尹曼, 薛阳, 等. 同步发电机励磁控制方法的发展与展望[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5):108-117. CHENG Qiming, CHENG Yinman, XUE Yang, et al. Development and prospects of excitation control methods for synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5):108-117.
- [12] 谢欢, 吴涛, 王超, 等. 发电机过励限制网源协调性能优化技术[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2):123-128. XIE Huan, WU Tao, WANG Chao, et al. Optimization technology of source-grid coordination performance based on over excitation limiter of generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(02):123-128.
- [13] 张立霞, 王高山, 汪友华, 等. 暂态稳定分析典型励磁模型仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1):77-80, 85. ZHANG Lixia, WANG Gaoshan, WANG Youhua, et al. Simulation of typical excitation models for power system transient stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1):77-80, 85.
- [14] 刘取. 电力系统稳定性及发电机的励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007:7-19.
- [15] 谢欢, 苏为民, 朱红伟, 等. 基于V形曲线的定子电流限制改进方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7):144-148. XIE Huan, SU Weimin, ZHU Hongwei, et al. Improved method of stator current limit based on V-curve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7):144-148.
- [16] 杨哲, 谢欢, 刘青, 等. 发电机组涉网保护与励磁控制协调配合研究[J]. 华北电力技术, 2017(6):48-53. YANG Zhe, XIE Huan, LIU Qing, et al. Research on mating performance evaluation of grid-related protection and excitation control of generating units[J]. North China Electric Power, 2017(6):48-53.

#### 作者简介:



梁浩

梁浩(1987—),男,河北辛集人,工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为励磁系统理论分析和现场试验等(E-mail: liangh\_0625@163.com);

谢欢(1979—),男,湖南衡阳人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制、励磁系统理论分析等(E-mail: xiaosan\_616@aliyun.com);

吴涛(1969—),男,陕西西安人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制、励磁系统理论分析等(E-mail: wu.tao@ncepri.com.cn)。

(编辑 李莉)

## Simulation analysis and performance evaluation of AVR characteristics in real cascading failure

LIANG Hao<sup>1</sup>, XIE Huan<sup>1</sup>, WU Tao<sup>1</sup>, ZHANG Guangtao<sup>1</sup>, ZI Peng<sup>2</sup>, ZHANG Rao<sup>3</sup>, SU Weimin<sup>1</sup>

(1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Beijing 100045, China;

2. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100010, China;

3. Department of Electrical Engineering and Automation, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

**Abstract:** It is of great significance for excitation control system to improve the transient process and prevent voltage instability under the condition of cascading failure. The principle and simulation model of SCL (Stator Current Limit) loop of AVR (Automatic Voltage Regulator) are introduced, and the influence of a real field cascading failure on an adjacent generator unit and the response process of its AVR are analyzed, including multiple force excitation, SCL action, instability caused by low terminal voltage, etc. On this basis, the RTDS (Real Time Digital Simulator) is used to build the one-machine infinite-bus primary system and the main and auxiliary control loops of AVR. Through the simulation of external faults and AVR regulating characteristics, the SCL loop of AVR and the characteristics of self-shunt excitation mode of generator under serious faults are analyzed emphatically and the optimization suggestion is proposed.

**Key words:** cascading failure; automatic voltage regulator; RTDS; voltage stability; stator current limit

## 附录

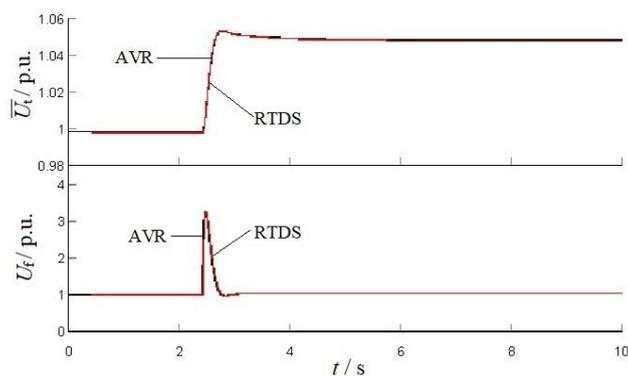


图 A1 空载 5% 阶跃试验下机端电压和励磁电压波形对比图

Fig.A1 Comparison chart of terminal voltage and excitation voltage in no load 5% voltage step test

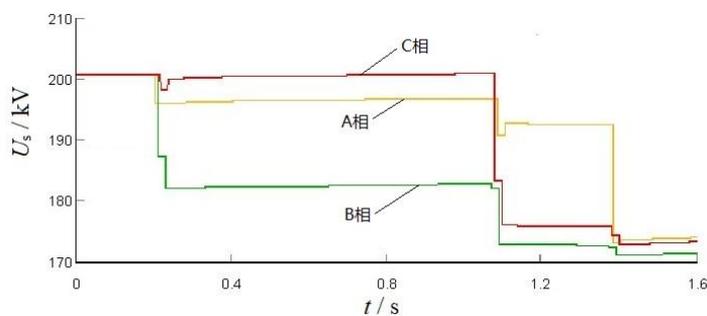


图 A2 第一次故障下  $U_s$  变化的仿真曲线

Fig.A2 Simulative curves of  $U_s$  under first fault

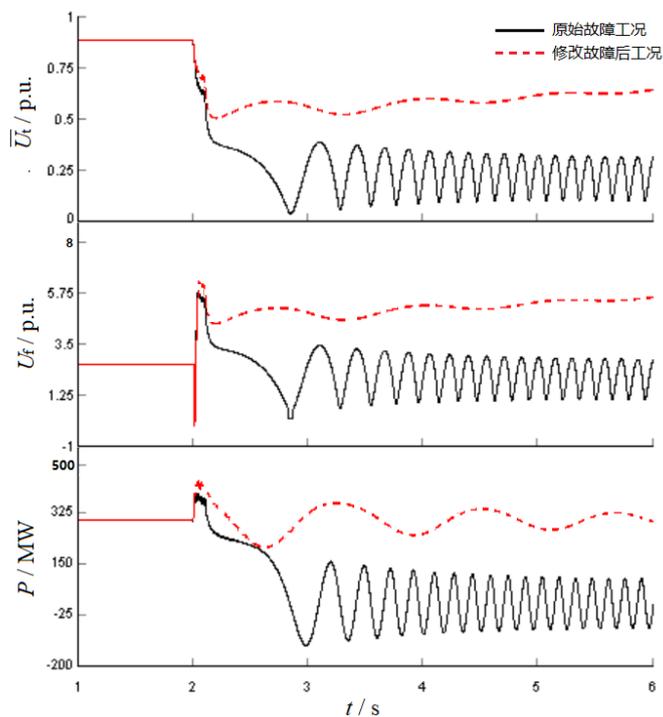


图 A3 修改故障严重程度后第二次故障下机组电气量的仿真曲线

Fig.A3 Simulative curves of generator electrical quantities under second fault after modifying fault severity