

DOI: 10.7667/PSPC170081

## 调相机接入对发电机失磁保护的影响

郑涛<sup>1</sup>, 余青蔚<sup>1</sup>, 詹荣荣<sup>2</sup>, 于硕<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 近年来, 随着电网“强直弱交”的问题日渐突出, 同步调相机重新受到关注, 300 Mvar 大型同步调相机即将投入使用。但调相机引入的同时, 也会给系统继电保护的正常运行造成一定影响。针对调相机接入对发电机失磁保护的影响进行了分析研究。运用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建单机无穷大系统仿真模型, 分别在发电机带不同负荷水平及不同失磁故障类型的条件下进行仿真。仿真结果表明, 调相机的接入, 会导致发电机失磁保护延时动作甚至拒动, 威胁发电机的安全运行。

**关键词:** 调相机; 发电机失磁保护; 无功补偿; 延时动作

### Impact of synchronous condenser access on generator loss of excitation protection

ZHENG Tao<sup>1</sup>, YU Qingwei<sup>1</sup>, ZHAN Rongrong<sup>2</sup>, YU Shuo<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Recently, more attention is paid to Synchronous Condenser (SC) as the problem of “strong DC and weak AC” is becoming increasingly serious. 300 Mvar SC will be put into service soon, which may affect the normal operation of the system relay protection. This paper analyses the impact of the SC access on the operation of Loss of Excitation (LOE) relay. A single machine infinite bus system model with SC is established in PSCAD/EMTDC and the operation of LOE protection under different generator loadings and different LOE modes is simulated. The simulation results show that the installation of the SC has adverse impacts on the LOE relay in the form of delay time and/or under-reach phenomenon, which is bound to threaten the security of generators.

This work is supported by Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Plan of China (No. 2016YBF0900600).

**Key words:** synchronous condenser; generator loss of excitation (LOE) protection; reactive power compensation; delay operation

## 0 引言

电压调节及无功补偿是电力系统稳定性的重要内容, 已得到国内外的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。随着直流输电、特高压等技术的发展以及电力电子设备的大量应用, 电网运行特性变化很大, 交流与直流、送端与受端相互影响, 带来电压和频率稳定、电网的安全运行等问题<sup>[3-4]</sup>。电网可靠运行要求系统具有充足的无功储备、合理的无功电源配置。电力系统的无功电源主要包括同步调相机、并联电容器、电抗器和

静止补偿器等装置。

常规直流换流站需要消耗大量无功功率, 其主要靠换流站内静态无功补偿装置提供, 当系统出现大扰动时, 直流系统换流站吸收的无功功率可能显著增加, 但是静止无功补偿装置出力反而减小<sup>[5-7]</sup>, 将导致电网局部动态无功补偿能力不足, 电网电压失稳风险大幅增加。与静止无功补偿装置相比, 同步调相机无功补偿容量大, 同时, 在电网电压下降的情况下, 调相机的励磁系统能够自动调节实行强行励磁, 可持续向系统提供无功功率<sup>[8-9]</sup>。

国家电网公司规划“十三五”期间投运一批大型调相机组。大容量同步调相机可以提高直流输电系统接入的短路比, 增强交流侧电网的动态电压支

撑能力<sup>[10]</sup>,但这必然会影响到目前基于阻抗、电压、相角等电气量的继电保护装置的正确动作,威胁到电力系统的安全稳定运行。因此,有必要开展调相机接入对系统继电保护影响的相关研究。

目前缺乏大容量调相机对电网和继电保护特性影响的研究。少有的关于补偿元件对保护影响的研究主要集中于串补电容、SVC及STATCOM元件。文献[11]探讨了晶闸管开关投切电容器(TSC)型的无功静止补偿装置投切而产生的不平衡现象,研究了这种不平衡对继电保护装置的影响。文献[12]提出了静止无功补偿器的接入会使输电线路阻抗的均匀性受到破坏,从而对故障分量继电器产生相应的影响。文献[13-14]分别分析了STATCOM对输电线路距离保护和发电机失磁保护的影响。研究表明,STATCOM的装设使距离保护测量阻抗中产生了一个附加阻抗,从而影响阻抗继电器正常动作,同时,STATCOM的接入也会导致失磁保护延时动作甚至拒动。

考虑到大容量调相机接入电网后,发电机发生失磁故障时,调相机会向发电机注入无功功率,影响失磁保护动作时间,甚至可能造成失磁保护拒动。本文主要研究调相机对失磁保护的影响。基于对调相机无功补偿特性以及发电机失磁保护的理论分析,本文针对调相机接入对失磁保护动作特性的影响进行了详细的仿真分析,并得到了以下结论:调相机接入会导致保护延迟动作,且延迟时间取决于发电机所带负荷水平、发电机失磁程度、调相机的额定容量和接入位置。本文的研究为大型同步调相机的投运提供了有益的参考。

## 1 调相机基本工作原理

调相机是一种接在电网上空载运转、专门调整系统无功功率的同步电机,它既无原动机拖动,其轴上又不带任何机械负载<sup>[15]</sup>。在电网电压下降的情况下,调相机的励磁系统能够自动调节,实行强行励磁,向电网提供无极连续调节的感性无功。

同步调相机的无功功率调节方式类似于同步发电机。以电动机惯例为正方向,图1表示励磁电流 $I_f$ 和同步电机输出电流 $I$ 的关系曲线,即同步电机的V形曲线<sup>[16]</sup>。V形曲线右侧为过励区域,同步电机输出感性无功功率;左侧为欠励区域,同步电机吸收感性无功功率。当电磁功率 $P_{em}$ 一定时,比如 $P_{em}=0$ (调相机运行工况),通过调节励磁电流 $I_f$ ,改变同步电机的电流和功率因数,进而调节无功功率的大小和性质。

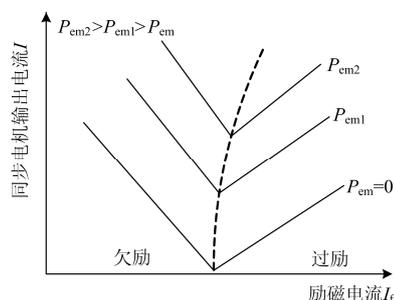


图1 同步电机励磁电流调节曲线

Fig. 1 Field current regulating curve of synchronous motor

## 2 发电机失磁保护基本原理

发电机失磁是指正常运行的发电机励磁电流全部或部分消失。发电机失磁后将过渡到异步运行,转子出现转差,定子电流增大,定子电压下降,有功功率下降,无功功率反向并且逐渐增大;在转子回路中出现差频电流;电力系统电压下降及某些电源支路过电流。电气量的上述变化,在一定条件下,将破坏电力系统的稳定运行,威胁发电机本身的安全<sup>[17]</sup>。因此,对于同步电机失磁故障,需要单独一种保护来预防失磁所带来的危害。

目前国内主要采用基于发电机机端测量阻抗的发电机失磁保护判据。在阻抗平面上,发电机失磁前,机端测量阻抗的轨迹位于第一象限(迟相运行)或第四象限(进相运行)的稳定工作点。发电机失磁后,机端测量阻抗的轨迹将沿着等有功阻抗圆过渡到异步边界阻抗圆内部。基于上述特征,常用的失磁保护将机端测量阻抗进入预先整定的阻抗圆作为发电机失磁的主要判据。根据整定阻抗的不同,又分为静稳边界阻抗圆和异步边界阻抗圆。如图2所示,圆I为静稳边界阻抗圆,圆II为异步边界阻抗圆, $X_d$ 为发电机同步电抗, $X'_d$ 为发电机暂态电抗, $X_s$ 为系统电抗<sup>[18]</sup>。本文采用异步边界阻抗圆作为失磁保护主要判据。

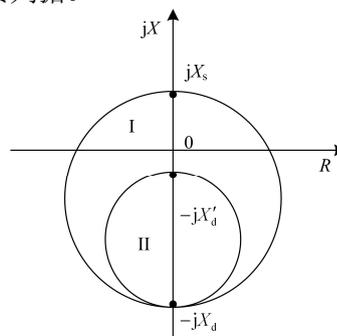


图2 静稳边界阻抗圆和异步边界阻抗圆

Fig. 2 Static-state impedance circle and asynchronous impedance circle

### 3 调相机对发电机失磁保护的影响分析

#### 3.1 发电机等有功阶段时间特性分析

发电机从失磁开始到临界失步所经历的阶段称为等有功阶段,由第2节可知,发电机失磁保护的動作时间与等有功阶段持续的时间有关,下面对等有功阶段时间特性进行分析。以并网的汽轮发电机为例。

发电机与无穷大系统并列运行时,其等值电路如图3所示。

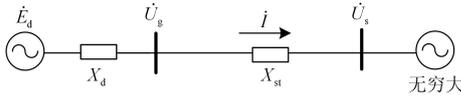


图3 发电机-无穷大系统的等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit of single machine infinite bus system

$\dot{E}_d$  为发电机的直轴同步电势;  $\dot{U}_g$  为发电机机端电压;  $\dot{U}_s$  为无穷大系统母线电压;  $i$  为定子电流;  $X_d$  为发电机直轴同步电抗;  $X_{st}$  为发电机与无穷大系统间的联系阻抗;  $\delta$  为  $\dot{E}_d$  与  $\dot{U}_s$  的夹角。

对于汽轮发电机,  $X_d \approx X_q$ , 其中  $X_q$  为发电机交轴同步电抗, 则失磁前正常运行时, 发电机的有功功率  $P_0$  如公式(1)所示。

$$P_0 = \frac{E_{d0} U_s}{X_d + X_{st}} \sin \delta_0 \quad (1)$$

式中:  $E_{d0}$  为失磁前的同步电势;  $\delta_0$  为失磁前的功角。

在等有功阶段内, 有功功率  $P$  保持不变, 等于失磁前的  $P_0$ , 则在此阶段内的任一瞬时, 均有

$$E_d \sin \delta = E_{d0} \sin \delta_0 \quad (2)$$

当发电机临界失步时, 功角  $\delta = \delta_{jw} = 90^\circ$ , 设此时的同步电势  $E_d = E_{djw}$ 。将  $\delta = \delta_{jw} = 90^\circ$  和  $E_d = E_{djw}$  代入式(2), 可得

$$E_{djw} = E_{d0} \sin \delta_0 \quad (3)$$

由文献[19]可知, 发电机失磁后, 其同步电势  $E_d$  随时间变化的基本方程如式(4)所示。

$$E_d + T'_d \frac{dE_d}{dt} = E_{dp} + (T_{d0} - T'_d) U_s \sin \delta \frac{d\delta}{dt} = E_{dp} + E_s \quad (4)$$

式中:  $T'_d = \frac{X'_d + X_{st}}{X_d + X_{st}} T_{d0}$ , 为定子经联系阻抗  $X_{st}$  通路时励磁绕组的时间常数;  $E_{dp}$  为励磁机供给的强迫励磁电流所感应的同步电势;  $E_s$  为转差电势。

在等有功阶段内, 转差率  $s$  很小, 可以近似认为  $s=0$ , 所以转差电势  $E_s=0$ [20]。设发电机发生全失磁, 则  $E_{dp}=0$ 。将  $E_s=0$  和  $E_{dp}=0$  代入式(4)中, 得

$$E_d + T'_d \frac{dE_d}{dt} = 0 \quad (5)$$

求解该微分方程, 则有

$$E_d = E_{d0} e^{-\frac{t}{T'_d}} \quad (6)$$

设等有功阶段的持续时间为  $t=t_{jw}$ , 将  $E_d=E_{djw}$  和  $t=t_{jw}$  代入式(6)中, 得

$$E_{djw} = E_{d0} e^{-\frac{t_{jw}}{T'_d}} \quad (7)$$

根据式(3)和式(7), 可得汽轮发电机等有功阶段的时间特性方程为

$$\sin \delta_0 = e^{-\frac{t_{jw}}{T'_d}} \quad (8)$$

对式(8)等号两端取自然对数, 化简可得

$$t_{jw} = T'_d \ln \frac{1}{\sin \delta_0} = T'_d \ln \frac{E_{d0} U_s}{(X_d + X_{st}) P_0} \quad (9)$$

式(9)表明, 发电机失磁前有功功率  $P_0$  越大, 或者同步电势  $E_{d0}$  越小, 或者励磁绕组的时间常数  $T'_d$  越小, 或者发电机直轴同步电抗  $X_d$  越大, 或者联系阻抗  $X_{st}$  越大, 则等有功阶段时间  $t_{jw}$  越短, 发电机失磁后越容易失步。

发电机失磁后吸收无功, 引起机端电压下降, 此时调相机检测到电压降低, 会向发电机注入无功功率以维持系统电压。维持系统电压相当于减小系统联系阻抗[21], 由式(9)可知, 联系阻抗  $X_{st}$  越小, 等有功时间越长, 机端测量阻抗进入失磁保护阻抗圆的时间延长, 因而影响失磁保护正确动作。

#### 3.2 调相机接入后失磁故障动态响应特性

根据图4在PSCAD中建立仿真模型。发电机经变压器升压后, 再经输电线路接入系统中。调相机于线路中点接入电网。为研究调相机对失磁保护的影响, 发电机失磁保护采用异步边界圆判据。分别在发电机带不同负荷水平及不同失磁故障形式的条件下进行仿真, 并对失磁后动态响应特性进行分析。

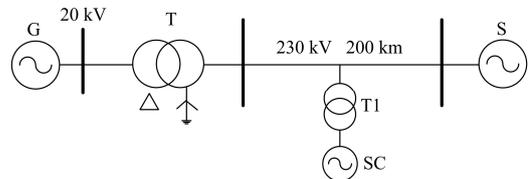


图4 接入调相机的仿真系统接线图

Fig. 4 Simulation system diagram including SC

模拟发电机带90%额定负荷在3s时刻发生励磁绕组直接短路引起的全失磁故障, 分别在电网未接入调相机和接入调相机下进行仿真。发电机输出有功功率、机端电压分别如图5和图6所示。调相

机输出无功功率如图 7 所示。

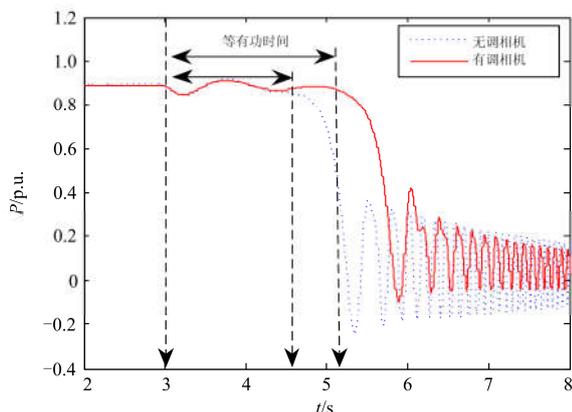


图 5 发电机输出有功功率

Fig. 5 Output active power of generator

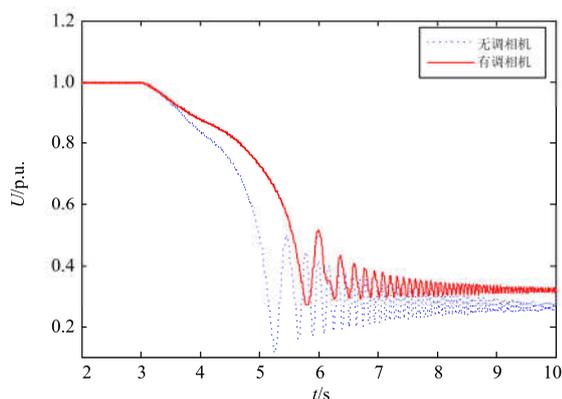


图 6 发电机机端电压

Fig. 6 Output voltage of generator

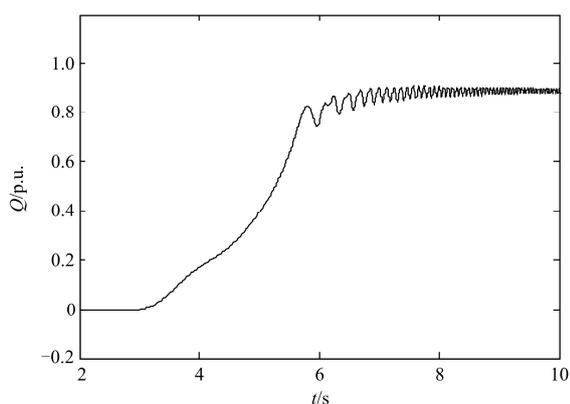


图 7 调相机输出无功功率

Fig. 7 Output reactive power of generator

分析仿真结果发现:

接入调相机后, 调相机检测到电压降低, 会向发电机注入无功功率, 减缓了机端电压下降的趋势, 延长了发电机等有功时间, 导致发电机发生失步的

时间滞后。另外, 发电机机端测量阻抗如图 8 所示。

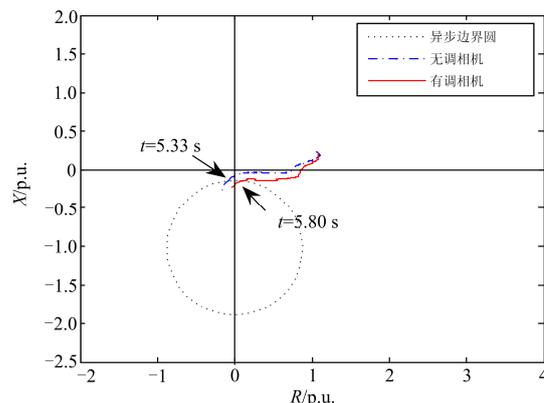


图 8 发电机机端测量阻抗轨迹

Fig. 8 Impedance trajectory calculated by LOE relay

由图 8 可知, 接入调相机前后, 机端测量阻抗分别在 5.33 s 和 5.80 s 时进入异步边界圆。由于调相机的接入, 机端测量阻抗进入异步边界圆的时间滞后了 0.47 s, 相应地, 发电机失磁保护动作时间延长了 0.47 s。

分别在发电机所带不同负荷水平及不同失磁故障类型下进行仿真, 仿真结果如表 1 所示。

由表 1 可得到以下结论:

1) 当有功功率恒定时, 发电机失磁程度由深到浅, 进入异步边界圆时间越长, 而且由于调相机的接入导致失磁保护动作的延时时间越长。

2) 当励磁电压恒定时, 发电机所带负荷由重到轻, 进入异步边界圆时间越长, 延时时间越长。

因此, 可以推论, 发电机所带负荷水平越轻, 失磁程度越轻, 失磁保护动作的延时时间越长, 甚至有可能出现失磁保护拒动的情况。以发电机带 40% 额定负荷在 3 s 时刻发生部分失磁故障(60%失磁)为例, 发电机机端测量阻抗如图 9 所示。

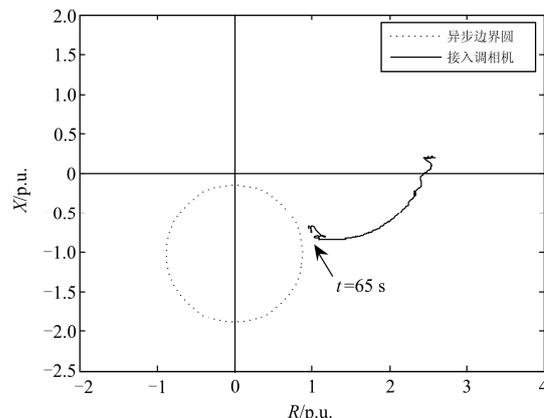


图 9 发电机机端测量阻抗轨迹

Fig. 9 Impedance trajectory calculated by LOE relay

表 1 发电机带不同负荷水平及不同失磁故障类型下失磁保护延时情况  
Table 1 Relay time of different generator loadings and different LOE modes

故障类型	全失磁			80%失磁			60%失磁		
	1 p.u.	0.9 p.u.	0.8 p.u.	1 p.u.	0.9 p.u.	0.8 p.u.	1 p.u.	0.9 p.u.	0.8 p.u.
无SC	4.88	5.33	5.84	5.16	5.69	6.45	5.51	6.31	7.46
有SC	5.31	5.80	6.32	5.65	6.38	7.17	6.21	7.27	8.58
延时时间/s	0.43	0.47	0.48	0.49	0.69	0.72	0.70	0.96	1.12

注：无 SC、有 SC 分别表示接入调相机前后机端测量阻抗进入异步边界圆的时间

由图 9 可知，发电机发生失磁 65 s 后，机端测量阻抗仍未进入异步边界圆内，即可视为失磁保护拒动。

同时，考虑到输电线参数和调相机额定容量对结果的影响，通过仿真，得到以下结论：

- 1) 接入调相机的额定容量越大，发电机失磁保护延迟时间越长；
- 2) 输电线的阻抗参数越大，发电机失磁保护延迟时间越长。

### 3.3 调相机的接入位置对发电机失磁保护的影响

由于无功补偿设备安装在线路中点会提高系统的暂态稳定性，并且研究分析表明，在两机系统中，使用中点补偿是最好的选择。但是在工程中，为了维护的方便以及其他的理由，通常都将调相机安装在变电站，即线路的始端或者末端，因此，本文分别考虑调相机位于线路始端和线路中点对发电机失磁保护的影响。调相机于线路始端接入电网，其仿真系统接线图如图 10 所示。

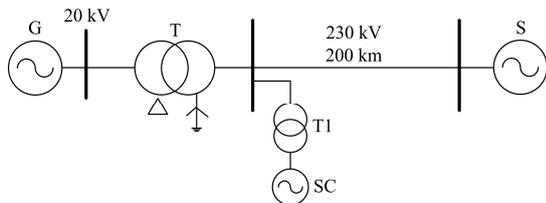


图 10 调相机位于线路始端的仿真系统接线图

Fig. 10 Simulation system diagram including SC ahead of the line

模拟发电机带 90%额定负荷发生完全失磁故障，调相机以不同位置接入电网时，发电机输出有功功率和机端测量阻抗分别如图 11、图 12 所示。

由图 11、图 12 可知，调相机位于线路始端时，发电机失磁后的等有功时间更长，而且机端测量阻抗进入异步边界圆的时间越长，相应地，失磁保护动作时间越长。这说明调相机在线路始端接入电网比在中点处接入对发电机失磁保护影响更大。

调相机以不同位置接入电网时，发电机机端电压如图 13 所示。

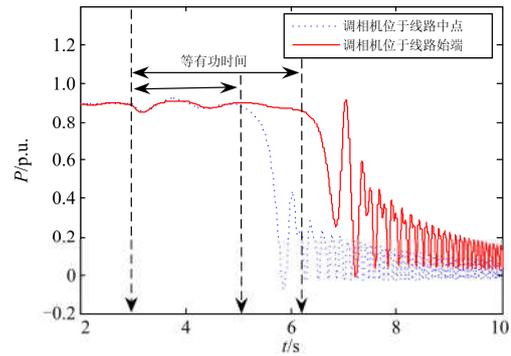


图 11 发电机输出有功功率

Fig. 11 Output active power of generator

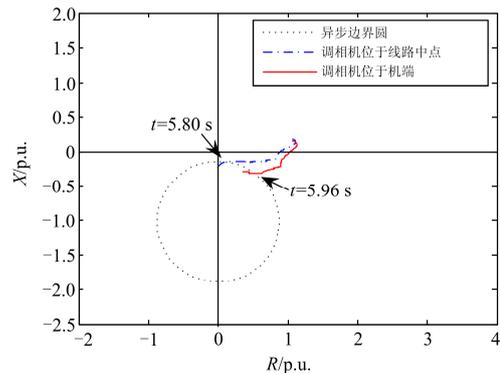


图 12 发电机机端测量阻抗轨迹

Fig. 12 Impedance trajectory calculated by LOE relay

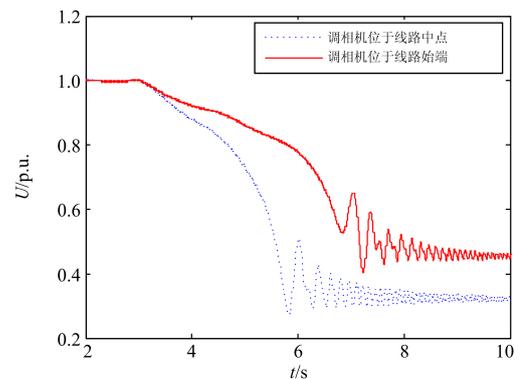


图 13 发电机机端电压

Fig. 13 Output voltage of generator

由图 13 可知, 相比接入线路中点, 调相机位于线路始端时, 发电机机端电压下降更加缓慢。这是由于调相机检测到接入点电压降低时, 可通过发出无功功率来提高接入点电压。因为线路始端离发电机机端更近, 所以调相机调压作用更加明显, 这导致调相机在线路始端接入电网比在中点处接入对发电机失磁保护影响更大。

## 4 结论

本文对调相机接入对同步发电机失磁保护的影响进行了研究。仿真结果表明调相机接入会导致保护延迟动作。动作延迟的时间取决于发电机所带负荷水平、发电机失磁程度、调相机的额定容量和接入位置。例如, 发电机所带负荷越小, 由调相机接入而导致的动作延迟时间会越长; 发电机失磁程度越浅, 延迟时间越长; 调相机在线路始端接入电网比在中点处接入对发电机失磁保护影响更大, 导致的动作延迟时间会越长。因同步发电机失磁会使电枢电流增大, 为防止定子绕组因过热而损坏, 必须要求保护快速动作, 因此未来亟需进行相关研究, 提出解决方案, 尽可能缩短保护动作时间, 消除调相机对发电机失磁保护的影响。

## 参考文献

- [1] 李晔, 张保会, 薄志谦. 低频低压继电器联合减载方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 48-54.  
LI Ye, ZHANG Baohui, BO Zhiqian. A combined deloading method based on the underfrequency and undervoltage relay[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 48-54.
- [2] 董萍, 徐良德, 刘明波, 等. 大电网多站点无功补偿协调控制的多目标混合优化方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 271-280.  
DONG Ping, XU Liangde, LIU Mingbo, et al. Multi-objective hybrid optimization method for coordinated control of reactive power compensation devices among multiple substations in large-scale power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 271-280.
- [3] 龚鸿, 江伟, 王渝红, 等. 基于静止同步补偿器与直流调制协调控制的低频振荡抑制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 68-75.  
GONG Hong, JIANG Wei, WANG Yuhong, et al. A survey on damping low frequency oscillation based on coordination strategy of static synchronized compensator modulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 68-75.
- [4] 邹东霞, 余锐, 聂娟红, 等. 300 Mvar 大型同步调相机的启动及继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 160-164.  
ZOU Dongxia, YU Rui, NIE Juanhong, et al. SFC start and relay protection of 300 Mvar large synchronous condenser[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 160-164.
- [5] 顾威, 李兴源, 陈建国, 等. 基于瞬时无功理论的 SVC 抑制次同步振荡的附加控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 107-111.  
GU Wei, LI Xingyuan, CHEN Jianguo, et al. Additional control design of SVC for mitigating subsynchronous oscillation based on instantaneous reactive power theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 107-111.
- [6] 徐式蕴, 刘津, 赵兵, 等. 藏中电网 SVC 配置方案及补偿策略分析[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2136-2142.  
XU Shiyun, LIU Jin, ZHAO Bing, et al. Configuration scheme of static var compensator for Central Tibet Power Grid and analysis on compensation strategy[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2136-2142.
- [7] 胡铭, 金小明, 田杰, 等. 静止无功补偿器改善特高压直流运行性能仿真研究[J]. 中国电力, 2009, 42(3): 35-39.  
HU Ming, JIN Xiaoming, TIAN Jie, et al. Research on simulation of improving operation performances of UHVDC transmission system using SVCs[J]. Electric Power, 2009, 42(3): 35-39.
- [8] 刘振亚, 张启平, 王雅婷, 等. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1015-1022.  
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, WANG Yating, et al. Research on reactive compensation strategies for improving stability level of sending-end of 750 kV grid in Northwest China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1015-1022.
- [9] 张宁宇, 刘建坤, 周前, 等. 同步调相机对直流逆变站运行特性的影响分析[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(3): 17-20.  
ZHANG Ningyu, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Analysis on the impact of synchronous condenser on DC inverter operating characteristic[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3): 17-20.
- [10] 崔挺, 沈阳武, 张斌, 等. 300 Mvar 级同步调相机对湖南电网稳定的影响研究[J]. 湖南电力, 2016, 36(3): 1-4.  
CUI Ting, SHEN Yangwu, ZHANG Bin, et al. Influences of 300 MVar synchronous condensers on the stabilities of Hunan power grid[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(3): 1-4.

- 1-4.
- [11] 裴志宏, 文劲宇, 张克元. TSC 型无功静止补偿装置非同期投切对继电保护的影响分析[J]. 继电器, 2000, 28(1): 10-12.  
PEI Zhihong, WEN Jinyu, ZHANG Keyuan. The studies of the influence to the relaying protection caused by asynchronous switch of thyristor switching capacitor (TSC)[J]. Relay, 2000, 28(1): 10-12.
- [12] 刘超, 杨永明, 熊小伏, 等. SVC 对故障分量方向保护影响的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 110-114.  
LIU Chao, YANG Yongming, XIONG Xiaofu, et al. Analysis of the impact of fixed SVC on fault component directional protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 110-114.
- [13] 刘青, 王增平, 张媛. 消除 STATCOM 对线路距离保护影响方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 93-98.  
LIU Qing, WANG Zengping, ZHANG Yuan. Research of a new method of eliminating the effect of STATCOM on distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 93-98.
- [14] GHORBANI A, MOZAFARI B, SOLEYMANI S, et al. Operation of synchronous generator LOE protection in the presence of shunt-FACTS[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 119: 178-186.
- [15] 周德贵. 发电机组作调相机运行的分析与实践[J]. 四川电力技术, 2001, 24(3): 1-6.
- [16] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 2 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [17] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [18] 高春如. 大型发电机组继电保护整定计算与运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [19] 姚晴林. 同步发电机失磁及其保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [20] 隋佳音, 毕天姝, 薛安成, 等. 新型发电机失磁保护加速判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 69-73.  
SUI Jiayin, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. A novel accelerated criterion for loss of field protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 69-73.
- [21] ELSAMAHY M, FARIED S O, SIDHU T. Impact of midpoint STATCOM on generator loss of excitation protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 724-732.

收稿日期: 2017-01-15; 修回日期: 2017-02-10

作者简介:

郑 涛(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护;

余青蔚(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: dq\_yqw@126.com

詹荣荣(1978—), 女, 高级工程师, 从事电力系统继电保护及动态模拟研究工作。

(编辑 魏小丽)