

MGST 新型潮流控制装置及其控制策略

华渊杰¹, 许其品^{1,2}, 杨玲^{1,2}

[1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106]

摘要: 针对目前电网建设面临的部分线路输电能力受限同时伴随高比例电力电子设备的入网导致的“电网惯性不足”问题, 提出了一种能够实现有功潮流控制及无功补偿, 并能为电网提供惯性支撑的电机-发电机串联变压器(MGST)新型潮流控制方法。利用同步电机本身具备较大惯性的条件, 在此基础上调整了其安装方式与电机的励磁控制策略, 最后基于 MATLAB/Simulink 平台对该设备进行仿真分析并将结果与同一情景下的统一潮流控制器(UPFC)装置的仿真结果作对比, 进而分析 MGST 装置的调节效果。仿真结果表明 MGST 装置具备潮流控制及稳定电压的能力, 由于电机转子惯性较大导致响应速度略低于 UPFC, 但作为一种新型潮流控制装置目前能够达到预期的调节效果。

关键词: 惯性支撑; 潮流控制; 电压稳定; 无功补偿; 励磁控制

中图分类号: TM72 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)11-0071-07

doi: 10.12177/emca.2022.057

Design of MGST Novel Power Flow Controller and Its Control Strategy

HUA Yuanjie¹, XU Qipin^{1,2}, YANG Ling^{1,2}

[1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China]

Abstract: The limited transmission capacity of some lines occurs in power grid construction, with facing the problem of "insufficient grid inertia" caused by high proportion of power electronic equipment entering the power grid. In order to solve these problems, a novel motor-generator series transformer (MGST) power flow control method is proposed. The control method can not only realize active power flow control and reactive power compensation, but also provide inertia support for the power grid. Taking advantage of the condition that the synchronous motor unit itself has large inertia, its installation mode and the excitation control strategy of the motor are adjusted. Finally, the equipment is simulated and analyzed based on MATLAB/Simulink platform, and the results are compared with the simulation results of unified power flow controller (UPFC) device under the same situation. So, the adjustment effect of MGST device is analyzed. The simulation results show that the MGST device has the ability of controlling power flow and keeping voltage stable. However, due to the large inertia of motor rotor, the response speed is slightly lower than that of UPFC. As a novel power flow controller, the MGST device can achieve the expected adjustment effect at present.

Key words: inertial support; power flow control; voltage stability; reactive power compensation; excitation control

收稿日期: 2022-04-07; 收到修改稿日期: 2022-06-20

作者简介: 华渊杰(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化。

许其品(1967—), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 研究方向为发电机励磁控制、电力系统分析等。

杨玲(1988—), 女, 硕士, 副高级工程师, 研究方向为发电机励磁控制、电力系统分析等。(通信作者)

0 引言

现代电力系统正逐步显现出高比例可再生能源和高比例电力电子设备接入的“双高”特征^[1-3]。随着大量分布式新能源与大量新增负荷的产生,现存的系统存在电压稳定性问题^[4-7],并且将近 1/4 的线路出现输电能力受限问题,而大规模架设多条线路则缺乏足够空间,征地困难,投资成本过高,潮流控制装置应运而生。目前使用的潮流控制装置多为柔性交流输电系统(FACTS)装置,FACTS 凭借其快速的响应能力和灵活、精确的控制能力在交流输电中能够起到较好的潮流控制效果。然而 FACTS 基于电力电子器件构成,一般不具有惯性,不具备惯量支撑能力。大量电力电子设备的接入导致整个电力系统惯性较低,对经典稳定性产生重大影响,而且还会引发诸如谐振或宽频振荡等新型稳定性问题。

目前,在实际工程应用中,统一潮流控制器(UPFC)被公认为先进且通用的潮流控制器^[8-11]。该潮流控制器能够同时控制影响电力线路输送功率的三个参数,即线路参数、节点电压幅值、节点电压相角,从而灵活改变线路的传输能力,发展潜力较大,国内在上海、南京、苏州皆有工程应用^[12-15]。

电机-发电机串联变压器(MGST)潮流控制装置与 FACTS 不同,是一种基于同步电机的具有惯性的新型潮流控制装置,一般安装于变电站节点^[16-17]。

本文阐述了 MGST 装置的结构与原理,并提出了该装置能够提高电网惯性的理论依据。在此基础上搭建了基于 MATLAB/Simulink 的仿真模型,分别采用 MGST 装置与 UPFC 装置实现统一潮流控制目标并分析使用效果。经过仿真试验,验证 MGST 装置在控制潮流、稳定电压方面的效果。

1 MGST 潮流控制装置主要结构介绍

MGST 装置由两台同步电机和一台串联变压器组成,两台磁场绕组相差 90°电角度的同步电机同轴刚性连接,一台为电机 G,另一台为电机 M。电机 M 并联接入电网,以下称电机 M 侧为 MGST 装置并联侧。同步电机 G 端口与串联变压器 ST 低压侧相连,串联变压器高压侧与线路串

联,且在串联变压器高压侧配置一台旁路开关,以下称同步电机 G 侧为 MGST 装置串联侧。该装置结构图如图 1 所示。

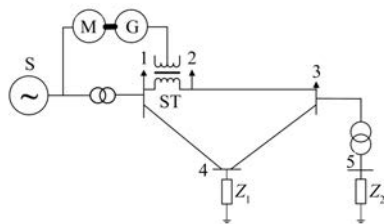


图 1 MGST 潮流控制装置结构图

该潮流控制装置一般安装在变电站,图 1 中电源 S 一般指变电站节点,串联变压器安装于线路送端。两级电机均采用隐极同步电机,其中同步电机 G 的励磁系统在正常运行时采用双向励磁控制,其励磁电流调节速度为秒级至分钟级;同步电机 M 的励磁系统采用常规励磁控制,励磁电流调节速度为毫秒级。

2 MGST 潮流控制装置基本原理

2.1 MGST 潮流控制装置串联侧原理

MGST 装置的串联侧工作原理是通过同步电机 G 输出一幅值可控、相角与线路送端节点电压的相角相差 90°左右且方向可变的电压,将此电压串入线路来替代电抗或电容串入线路中,通过调节励磁电流的大小和方向改变线路等效阻抗,从而调节线路传输的潮流。具体等效电路如图 2 所示。

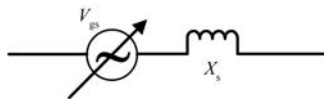


图 2 同步电机 G 等效原理图

可将同步电机 G 等效为可控电压源 V_{gs} ,通过串联变压器将此电压源串入线路。 X_s 为同步电机自阻抗。MGST 潮流控制回路的等效电路图如图 3 所示。

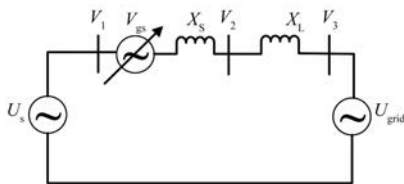


图 3 MGST 串联补偿等效原理图

X_L 表示线路电抗, $V_1 \angle \theta_1, V_2 \angle \theta_2, V_3 \angle \theta_3$ 分别为图 3 中 3 个节点的电压相量, 同时与图 1 中的节点 1、2、3 也分别对应。可控电压源幅值变化范围是 $[0, V_{gsmax}]$, 其相角 θ_{gs} 变化范围是超前于送端节点电压约 90° 或滞后于送端节点电压约 90° 。电压源补偿后的电压相量变化如图 4 所示。

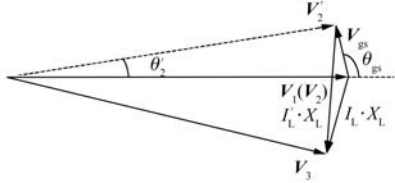


图 4 MGST 串联侧电压相量图

当 MGST 装置闭锁时, 相当于节点 1、2 重合, 即 $V_1 = V_2$ 。当起动 MGST 装置进行补偿时, 设 2 为线路送电端, 3 为受电端, 以节点 1 的电压相量 V_1 为参考电压作相量图, 补偿电压相量为 V_{gs} , 补偿前的线路送端电压相量为 V_2 , 补偿后的线路送端电压相量为 V'_2 , 由于补偿前后受端电压相量变化不大, 近似认为线路受端电压相量为 V_3 保持不变。

当 MGST 装置闭锁时, 装置所在线路流过潮流节点 2 的潮流 P_2, Q_2 如下所示:

$$P_2 = \frac{V_2 V_3}{X_L} \sin(\theta_2 - \theta_3) = \frac{V_1 V_3}{X_L} \sin(\theta_1 - \theta_3) \quad (1)$$

$$Q_2 = \frac{V_2^2}{X_L} - \frac{V_2 V_3}{X_L} \cos(\theta_2 - \theta_3) = \frac{V_1^2}{X_L} - \frac{V_1 V_3}{X_L} \cos(\theta_1 - \theta_3) \quad (2)$$

由于 MGST 装置的补偿作用, 叠加补偿电压后的送端实际电压相量变为 $V'_2 = V_1 + V_{gs}$, MGST 装置借助可调的电压幅值 V_{gs} 和可调相角 θ_{gs} 与传输线产生有功功率和无功率的交换。因此, 通过调整合适的 V_{gs} 和 θ_{gs} 可以达到控制线路传输的有功功率和无功率的目的, 这是 MGST 串联补偿的基本工作原理。补偿后线路的传输功率如下:

$$P'_2 = \frac{V'_2 V_3}{X_L} \sin(\theta'_2 - \theta_3) = \frac{V_3}{X_L} V_{gs} \sin(\theta_{gs} - \theta_3) - \frac{V_3}{X_L} V_1 \sin \theta_3 \quad (3)$$

$$Q'_2 = \frac{V'^2_2}{X_L} - \frac{V'_2 V_3}{X_L} \cos(\theta'_2 - \theta_3) = \frac{V_1^2}{X_L} - \frac{V_1 V_3}{X_L} \cos \theta_3 +$$

$$\frac{V_{gs}^2}{X_L} - \frac{V_{gs} V_3}{X_L} \cos(\theta_{gs} - \theta_3) + \frac{2 V_1 V_{gs}}{X_L} \cos \theta_{gs} \quad (4)$$

对比式(1)与式(2)可见, 控制 V_{gs} 和 θ_{gs} 可以达到调节线路潮流的目的。

2.2 MGST 潮流控制装置并联侧原理

并联侧同步电机 M 通过改变励磁电流改变电机电动势的大小, 从而调节吸收或发出无功功率的大小以维持与同步电机 M 端口电压的稳定。稳态情况下, 可以接受电网自动电压控制 (AVC) 指令实现无功功率闭环控制。同步电机 M 的电气相量图如图 5 所示。

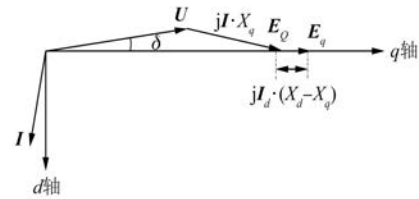


图 5 MGST 并联侧同步电机电气相量图

其中, U 为机端电压, I 为电枢电流, E_q 为 q 轴虚拟电动势, E_q 为电机电动势。正常运行时, 并联侧同步电机从电网吸收的有功功率用于驱动 MGST 串联侧电机旋转以及克服各种机械摩擦转矩和定转子损耗, 由此在额定运行时存在一个功角 δ 。正常运行时 $U_d = U \sin \delta, U_q = U \cos \delta$, 一般认为电枢电阻极小可忽略, 则 $i_d = I, i_q = 0$ 。本装置采用隐极同步电机, 认为 dq 轴电抗大致相等 $X_d \approx X_q$, 由此可得无功功率公式为

$$Q = UI \cos \delta = U \frac{\sqrt{(E_q - U \cos \delta)^2 + (U \sin \delta)^2}}{X_d} \cos \delta \quad (5)$$

由于 $P = \frac{E_q U}{X_d} \sin \delta$, 则 $\delta = \arcsin \frac{P X_d}{E_q U}$, 当电机

M 提供的有功功率一定时, 无功功率 Q 的调节与电机电动势 E_q 正相关, E_q 由励磁电流 i_{mf} 进行调节, 因此通过调节 i_{mf} 可以控制电机 M 发出无功功率的大小。

2.3 同步发电机组的惯性分析

同步电机的惯性可以用转动惯量 J 或惯性时间常数 T 表示。本文需要对比 MGST 与 UPFC 的惯性大小而 UPFC 不存在转动惯量, 因此使用惯性时间常数 T 来描述潮流控制装置的惯性^[18]。

对于同步电机,其惯性时间常数 T_G 可以表示为

$$T_G = \frac{W_G}{S_{NG}} \quad (6)$$

式中: W_G 为转子动能; S_{NG} 为同步电机的额定容量^[19]。

对于电力电子设备,惯性来源于直流侧电容储存的能量,如 UPFC 这样的电力电子设备其惯性时间常数 T_c 可以表示为

$$T_c = \frac{W_c}{S_{NU}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot C V_{dc}}{S_{NU}} \quad (7)$$

式中: W_c 为直流电容 C 中储存的能量; S_{NU} 为逆变器额定容量; C 为直流电容; V_{dc} 为背靠背换流器的直流电容电压^[20-21]。

假设 W_c 的大小为 1/4 工频周期内,串联换流器释放有功功率最大值。由于 UPFC 的串联换流器有功功率最大值即串联换流器容量的值, T_c 的值约为 0.25 s。

一般隐极式同步电机的惯性时间常数为 2.5~6.0 s,而同步电机组运行时其惯性约为一般同等容量电机的 65%,由此可知 MGST 装置惯性时间常数约为 1.625~3.900 s^[22],远大于 UPFC。因此,与 UPFC 相比,使用 MGST 潮流控制装置能给电网提供更大的惯性,从而提高电网稳定性。

3 MGST 潮流控制装置环网仿真

3.1 仿真模型构建

根据图 1 结构搭建主网电压 220 kV 的环网模型, Z_1 和 Z_2 为功率因数 $\cos\varphi=0.9$ 的阻感性负荷,负荷 Z_2 有功功率大小设置为 500 MW,负荷 Z_1 有功功率大小设置为 5 MW,远小于负荷 Z_2 。可根据变电站需要补偿的无功功率确定同步电机 M 容量,同步电机 G 容量根据工程实际需要调节的线路有功功率确定,串联变压器 ST 容量一般略大于同步电机 G 的容量。

设置仿真模型中同步电机 M 容量为 100 MW,同步电机 G 容量为 50 MW,在被控线路传输潮流为 235 MVA 的基础下,该线路潮流能够调节的范围是 ± 60 MVA;文中引以对比的 UPFC 参数配置参考了 220 kV 上海蕴藻浜 UPFC 装置采用的运行参数,串、并联变流器容量皆设置为

50 MVA,其最大调节范围一般不超过 ± 50 MVA。

3.2 MGST 装置控制策略

3.2.1 MGST 装置串联侧控制策略

有功潮流控制环如图 6 所示。

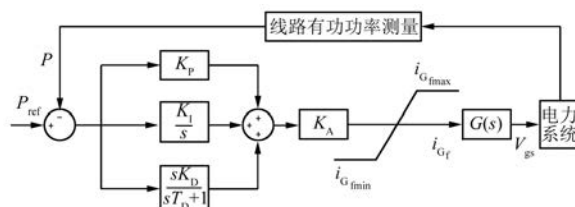


图 6 MGST 潮流控制装置串联侧控制框图

其中 P_{ref} 为有功潮流参考值,一般来自于调度指令;由于电机的励磁需要控制在一个安全范围内进行调节,增加一个限幅环节,PID 控制器和励磁限幅环节控制励磁电压组成励磁控制环节; $G(s)$ 为同步电机环节,该环节输出一个补偿电压对电力系统进行串联补偿;通过线路有功功率测量环节进行负反馈调节。

当潮流控制设备并入电网但未接受调度指令时,电网潮流应保持不变。当潮流控制设备接受调度指令时, MGST 装置串联侧电机将根据调度指令通过控制电机 G 的励磁来进行线路补偿,从而调节线路有功潮流直至调度指令给出的参考值为止。

3.2.2 MGST 装置并联侧控制策略

与串联侧不同的,并联侧主要的功能是稳定机端电压,必要时进行 AVC 控制。内环采用以电机 M 端口电压为参考变量的闭环控制,另外添加了无功外环用以在系统正常运行时通过外环的调节改变电机的电压参考值,从而根据调度指令对电机发出的无功进行定量的调节^[23-25]。控制环如图 7 所示。

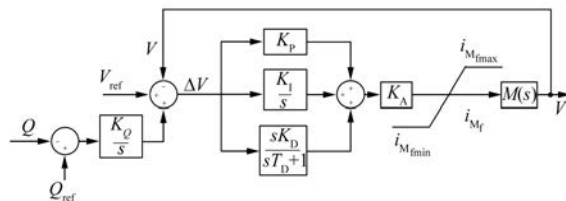


图 7 MGST 潮流控制装置并联侧控制框图

其中 V_{ref} 为电机 M 端口电压参考值, Q_{ref} 为电机发出的无功功率参考值。PID 控制器和励磁

限幅环节控制励磁电压组成同步电机励磁控制环节; $M(s)$ 为同步电机环节,最终调节与反馈的变量为同步电机 M 的机端电压。其中内环控制为主要的控制策略,其以电机端电压为反馈量,当给定机端电压参考值时,励磁电流控制模块进行较为快速的自动调节来改变机端电压,调节电机端电压至参考值为止,是为应对暂态情况下电压突变进行的一种快速响应控制方案。外环控制是一种慢速调节,作用在稳态条件下,其反馈量是电机输出的无功功率,控制目的为通过改变端电压参考值,从而能够使电机在稳态下发出定量的无功功率,一般根据调度部门提供的给定值进行定量的无功功率补偿,当未收到指令时,无功外环无参考值不参与电压控制。

3.3 仿真验证

本仿真针对模型中的线路潮流和变电站 S 端口电压的变化进行了测量与分析,被测线路 L_{23} 为图 1 中节点 2、3 之间的传输线路,被测电压为变电站节点电压,亦即电机 M 端口电压。

3.3.1 MGST 装置串联侧控制仿真验证

MGST 装置闭锁时,闭合串联变压器高压侧旁路开关,使串联变压器旁路。此时测得的线路 L_{23} 上传输的自然有功功率为 230 MW,无功功率为 52 MVar。

当模拟第 40 s 接受来自调度的增加线路 L_{23} 的有功潮流至 280 MW 的指令时,通过控制 MGST 装置串联侧电机的励磁电流,逐步增加被控线路传输的有功功率至 280 MW 并维持不变,线路上的具体潮流变化情况如图 8(a) 所示,调节时间约为 30 s,调节过程平稳。如图 8(b) 所示为同等条件下使用 UPFC 进行潮流控制的效果图。

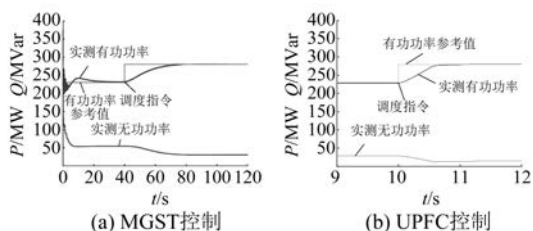


图 8 控制线路 L_{23} 有功潮流增加波形图

通过调节 UPFC 串联侧变流器的 PI 参数,UPFC 装置从响应调度指令开始平稳控制潮流,0.5 s 即达到指令要求。

控制线路 L_{23} 传输的有功功率从 230 MW 提高至 280 MW,大大提高了送、受两端之间输电断面的潮流输送能力。以本文采用的环网结构为例,若 MGST 装置闭锁状态下断面内双回线路皆未超出额定输送能力,则通过潮流控制此断面输送能力可提高 100 MW 以上。

当模拟第 40 s 时负荷 Z_2 突然增加,调度指令要求线路传输的有功功率限值不超过 280 MW 时,由于被测线路传输潮流越限,通过控制 MGST 装置串联侧电机的励磁电流,逐渐减小线路 L_{23} 有功功率传输直至限值并维持恒定,具体潮流变化情况如图 9(a) 所示,调节时间约为 20 s。图 9(b) 所示为同等条件下使用 UPFC 进行潮流控制的效果图,在 0.1 s 左右即能迅速将潮流控制到限定值。

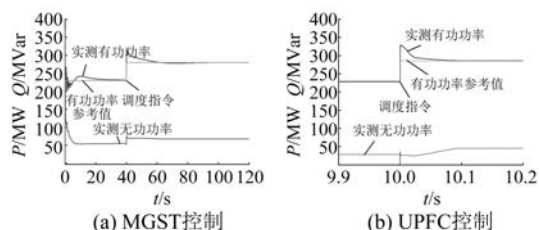


图 9 控制线路 L_{23} 有功潮流减小波形图

图 9 所示的负荷突增情况,送端和受端发生短时的有功功率不平衡状态,线路 L_{23} 短时间内电流突增,导致串联侧电机 G 负荷增加,机械转矩增加;电机 M 在线路 L_{23} 送端,由于负荷突增,电压下降,从而引起电磁转矩下降,短时间内两台电机转矩不平衡可能导致转速产生波动,由于电机组阻尼较大,转速波动幅度较小,此时电机 G 励磁快速下降以减小机械转矩,电机 M 励磁增加以提高电磁转矩,能够迅速消除转矩不平衡情况,使转速恢复。图 9 所示的情景表明,MGST 装置可以控制线路传输功率不越限,提高了线路的热稳定性。

本文设计的 MGST 装置用以对线路潮流进行分钟级的平稳慢速调节,对潮流突变状况下的响应较慢,仿真中的调节速度可以达到预期效果。

3.3.2 MGST 装置并联侧仿真验证

当模拟变电站节点处投入感性负荷时,并联侧电机端口电压降低,快速控制并联侧电机的励磁系统增加励磁电流,增发感性无功功率,从而提

高电机端电压,使得电机 M 端电压稳定在参考值。具体电机端电压幅值变化波形如图 10(a)所示,1.5 s 左右稳定电压,响应较为迅速。图 10(b)所示为同等条件下使用 UPFC 进行电压控制的效果图。

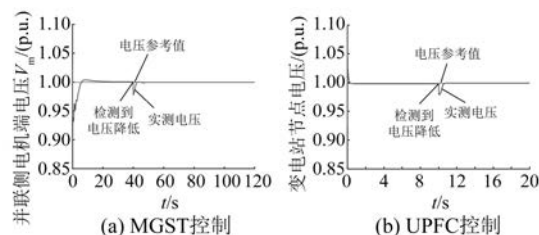


图 10 无功补偿情景下电机端电压波形图

给定潮流控制器的电压参考值,本文设电压参考值为 1 p. u.,通过调节 UPFC 装置并联侧 PID 参数可以控制 UPFC 响应速度,当变电站节点电压降低了 2%,迅速发出感性无功功率进行补偿,1 s 内使变电站节点电压达到参考值。MGST 装置的并联侧电机惯性较大,电压降低后调节励磁电流到发出感性无功进行补偿需要一定的响应时间,因此调节同样大小的电压需要的时间比 UPFC 略长。

当变电站节点由于无功功率过剩发生过电压情况,并联侧电机端口电压过高,快速控制励磁系统减小励磁电流,吸收系统中过剩的容性无功,使得电机 M 端电压稳定在参考值,电机 M 端电压幅值波形如图 11(a)所示,1.5 s 左右稳定电压。图 11(b)所示为同等条件下使用 UPFC 进行电压控制的效果图。

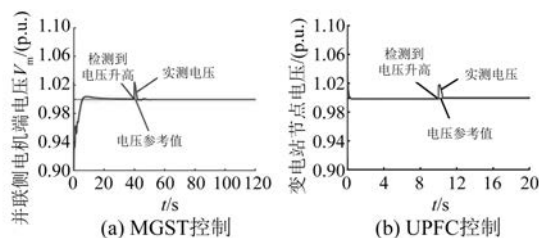


图 11 剩余无功消纳情景下电机端电压波形图

如图 11 所示,同样大小的电压偏差,UPFC 装置在 1 s 内可以完成调节,MGST 装置的调节时间与 UPFC 装置接近。

4 结 语

本文详细地介绍了一种具有惯性的新型潮流

控制装置 MGST 装置的结构与原理以及在电网中的安装位置。同时制定了 MGST 潮流控制装置的串联侧电机和并联侧电机的励磁电压控制策略并进行仿真试验,仿真结果表明:

(1) 通过控制 MGST 串联侧电机励磁电流的大小和方向可使被控线路有功潮流调节至调度指定值并维持恒定。MGST 潮流控制装置能够达到 UPFC 装置潮流控制功能。

(2) 通过控制并联侧电机励磁电流的大小, MGST 可以稳定电网电压,在其能力范围内可以实现进一步的无功补偿,进而支持电网电压在合理的水平。能够达到 UPFC 装置电压控制功能。

【参考文献】

- [1] 卫思明. 高比例新能源采用新型并网方式的电网稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
- [2] WEI S, ZHOU Y, HUANG Y. Synchronous motor-generator pair to enhance small signal and transient stability of power system with high penetration of renewable energy[J]. IEEE Access, 2017, 5: 11505.
- [3] WEI S, ZHOU Y, LI S, et al. A possible configuration with motor-generator pair for renewable energy integration[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 1: 93.
- [4] 桂林, 李岩军, 詹荣荣, 等. 大型调相机内部故障特征及纵向零序电压保护性能分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 145.
- [5] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 22.
- [6] 李桂芬, 李小龙, 孙玉田. 300 Mvar 空冷隐极同步调相机暂态特性仿真分析[J]. 大电机技术, 2021(5): 33.
- [7] 李锴, 邵德军, 徐友平, 等. 基于新一代调相机的多目标无功电压协调控制系统研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2961.
- [8] 刘津濂. UPFC 的潮流调节特性及控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [9] 高雯曼. UPFC 的优化配置及相关控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [10] 饶志. 统一潮流控制器增强电网恢复能力的控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [11] 吴迪. 多分布式电源并网运行仿真及 UPFC 在合肥电网中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.

- [12] 祁万春,杨林,宋鹏程,等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92.
- [13] 李璇,刘国静,朱磊,等. 含 UPFC 南京西环电网系统可靠性评估研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 26.
- [14] 谢伟,崔勇,冯煜尧,等. 上海电网 220 kV 统一潮流控制装置示范工程应用效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 136.
- [15] 杨林,蔡晖,汪惟源,等. 500 kV 统一潮流控制器在苏州南部电网的工程应用[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 47.
- [16] 刘兵,张鑫,余晓伟,等. UPFC 在省级电网应用的选址定容方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(1): 123.
- [17] 高雯曼,任建文,申旭辉,等. 基于断面负载均衡度的统一潮流控制器潮流优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 79.
- [18] 周莹坤,许国瑞,黄永章. MGP 系统为新能源电网提供惯性的实验研究[J]. 大电机技术, 2018(6): 12.
- [19] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 1994.
- [20] 谢攀,苏丰. UPFC 直流电容的选择与设计[J]. 电气传动自动化, 2018, 40(2): 37.
- [21] 严炜,潘征宇,时志雄,等. UPFC 在上海 220kV 电网中的设计和应用[J]. 电力与能源, 2019, 40(6): 654.
- [22] 周莹坤. 新能源同步机提升高比例新能源电网稳定性的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- [23] 石祥建,牟伟,韩焦,等. 大型同步调相机控制策略研究[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 44.
- [24] 刘晓丹. 同步调相机用于 UHVDC 系统的受端电压支撑研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [25] 汪一. 应用于特高压直流输电的同步调相机控制系统研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.

(上接第 21 页)

- [6] 金鸿雁,赵希梅,原浩. 永磁直线同步电机动态边界层全局互补滑模控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 1945.
- [7] MU C, ZONG Q, TIAN B, et al. Continuous sliding mode controller with disturbance observer for hypersonic vehicles [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2015, 2(1): 45.
- [8] 王要强,朱亚昌,冯玉涛,等. 永磁同步电机新型趋近律滑模控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 192.
- [9] MO L, LIU Y, ZHANG Y. Sliding mode variable structure control for surface permanent magnet synchronous motors based on a fuzzy exponential reaching law [J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8340956>.
- [10] KANG Z, YU H, LI C. Variable-parameter double-power reaching law sliding mode control method[J]. Automatika, 2020, 61(3): 345.
- [11] 张博,周达,蒋波涛. 基于 RBF 神经网络和扰动观测器的 PMLSM 位置控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(8): 90.
- [12] WU X, XU K, LEI M, et al. Disturbance-compensation-based continuous sliding mode control for overhead cranes with disturbances [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(4): 2182.
- [13] ULLAH I, PEI H. Fixed time disturbance observer based sliding mode control for a miniature unmanned helicopter hover operations in presence of external disturbances[J]. IEEE Access, 2020, 8: 73173.
- [14] 刘鑫,王丽梅. 基于摩擦和扰动补偿的永磁直线同步电机滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(4): 10.
- [15] CHEN M, LU J. High-precision motion control for a linear permanent magnet iron core synchronous motor drive in position platform [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 99.
- [16] YANG J, LI S, CHEN W. Nonlinear disturbance observer-based control for multi-input multi-output nonlinear systems subject to mismatching condition [J]. International Journal of Control, 2012, 85(8): 1071.