

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.008

电网移相器 RTDS 建模及应用场景分析

李群¹, 张宁宇¹, 高山², 刘建坤¹, 周前¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:电网移相器可以有效均衡电网潮流分布,提升供电能力。为掌握移相器参与电网潮流调节的暂态特性,文中首先分析了移相器的结构特点以及调节电网潮流的原理;然后,基于实时数字仿真平台建立了双芯对称型移相器的详细电磁暂态模型,分析了串、并联变压器在潮流控制中的具体作用,并分别在不同运行方式下研究了电网潮流分布情况以及移相器的暂态控制特性,结果表明,文中所建移相器模型可有效控制电网的潮流分布;最后,总结了移相器在电网中的典型应用场景,以实际电网为例,分析了移相器通过均衡线路潮流分布提升电网供电能力和清洁能源消纳能力的可行性,为潮流控制技术在我国电网中大规模推广应用提供借鉴。

关键词:移相器;潮流控制技术;实时数字仿真;电磁暂态建模;双芯对称型

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)02-0053-06

0 引言

受电网电源和负荷分布影响,潮流呈自然分布特性,导致线路轻重载情况普遍存在。轻载会造成资源浪费,影响电网经济运行;重载容易引起线路过载,制约电网供电能力提升^[1-5]。因此,发展电网潮流控制技术对于实现潮流可控、均衡线路负载、提升电网运行经济性有着重要意义^[6]。

近年来,随着我国电力电子应用技术水平的不断提高,基于柔性交流输电系统(flexible alternative current transmission systems, FACTS)的柔性潮流控制技术日趋成熟,越来越多潮流控制装置接入电网运行,如南京 220 kV 统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)^[7]、苏州 500 kV UPFC、上海 220 kV UPFC 和天津 220 kV 静止同步串联补偿器^[8-9],实现了电网潮流的灵活精准控制和供电能力的有效提升^[10-11]。这些 FACTS 装置可实现有功、无功潮流快速独立精准控制,在调控范围大、控制快速性要求高的场景中具有很高的推广价值。而稳态、经济型潮流控制技术能够以较低投资和运维成本实现有功潮流优化调控和电网供电能力提升,可在电网的挖潜增效中发挥重要作用^[12]。

移相器也称相角调节器,是一种典型的经济性潮流控制装置,通过在输电线路中串入幅值可调的电压,改变装置安装点电压的相位或幅值,从而控制输电线路稳态潮流,实现合理分配线路输送功率、降低输电成本等作用。移相器按其控制回路形

式主要分为机械式移相器以及晶闸管式移相器,前者采用有载调压开关,具有运行成本低和可靠性高等优点;后者采用换流阀,调节速度快,但是投资成本较高。由于机械式可控移相器运行可靠且成本较低,在欧、美等国家有着大量的应用,目前最高电压等级为 500 kV,穿越功率 1 630 MV·A,可调角度 $\pm 85^\circ$ 。文献[13]分析了移相器的主电路拓扑,并提出并联变压器、串联变压器等主设备参数设计方法;文献[14]采用相量分析法详细推导了移相角度、开关组态、等效阻抗之间的稳态相量关系,并通过实时数字仿真系统进行验证;文献[15]研究了双输出移相器的三序等值电路,并采用电磁暂态仿真软件 PSCAD 建立了详细的电磁暂态模型;文献[16]分析了晶闸管式移相器中阀组触发脉冲对系统运行的影响,提出触发脉冲控制策略及相应的检测方法;文献[17]探讨了应用移相变压器实现输电线路在线融冰的可行性,计算得到在空载和负载情况下线路融冰过程的电压降落,并提出相应的控制策略。

为掌握移相器在电网潮流控制中的调节特性,首先从理论上分析移相器调节电网潮流的原理;然后,基于 RTDS 平台建立双芯对称型移相器的详细电磁暂态模型,并对移相器的投切运行和潮流调节时的控制特性进行仿真分析;最后,对移相器在电网中的应用场景进行了归纳总结。

1 移相器结构及原理

1.1 工作原理

移相器在输电线路送、受端之间引入相位偏

收稿日期:2020-10-13;修回日期:2020-11-25

基金项目:2020年度江苏省第五期“333工程”科研项目“电网移相器关键技术研究及应用”(BRA2020084)

移,从而达到控制潮流的目的。如图 1 所示,移相器串联安装在线路中,在安装点输出一个幅值和相角可调的补偿电压,实现安装点线路电压 U_S 幅值和相角的调节。

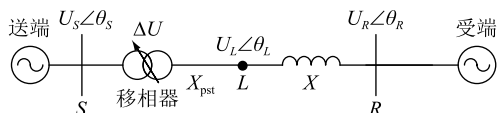


图 1 移相器接入系统等效示意

Fig.1 Equivalent schematic diagram of phase shift transformer feed into power grid

图 1 中, X 为线路等效阻抗; X_{pst} 为移相器等效电抗; S, R 分别为线路首端和末端; L 为移相器的末端节点; ΔU 为移相器的输出电压; U_S, U_R 分别为线路首端和末端的电压幅值; θ_S, θ_R 分别为线路首端和末端的电压相角; U_L, θ_L 分别为节点 L 的电压幅值和相角。

线路传输有功功率可表示为:

$$P = \frac{U_S U_R}{X + X_{pst}} \sin(\theta_S - \theta_R) = \frac{U_L U_R}{X} \sin(\theta_L - \theta_R) \quad (1)$$

通过调节移相器输出电压 ΔU , 改变装置两侧电压相角, 进而改变线路首末两端的相角差, 最终实现线路有功潮流的控制。各电压之间的相量关系如图 2 所示。

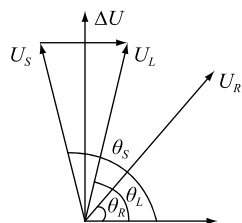


图 2 移相器接入系统后电压相角变化示意

Fig.2 Schematic diagram of voltage phase angle change after the phase shift transformer is connected to the system

1.2 拓扑结构

文中以双芯对称型移相器为研究对象, 其主要由串联变压器、变联变压器和有载调压机构组成, 串联变压器一次侧绕组带有中心抽头, 其余两端开口串联于输电线路中, 副边绕组三角形连接, 分别与调压机构输出端连接。并联变压器一次侧接于串联变压器一次侧中心抽头处, 星形连接, 且中性点接地, 副边绕组开路连接与对应的有载调压结构输入端连接。调压机构通过开关不同位置, 可获得双向共 27 个电压档位, 具体结构如图 3 所示。其中, 下标 A, B, C 为不同相序; U_{E1A} 为并联变压器 A 相一次侧电压。

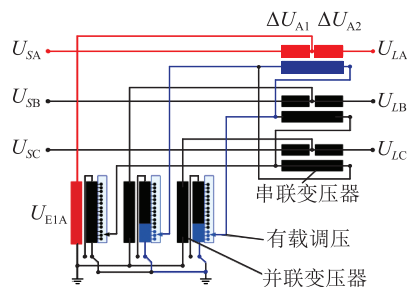


图 3 双芯式移相器结构

Fig.3 Structure of double core phase shift transformer

2 基于 RTDS 的电磁暂态建模

基于 RTDS 仿真平台, 建立移相器电磁暂态模型, 整体结构如图 4 所示, 分为串联变压器和并联变压器, 串联变压器接入线路中, 输出幅值可变的电压; 并联变压器为串变提供励磁电压, 详细模型可见图 5 和图 6。

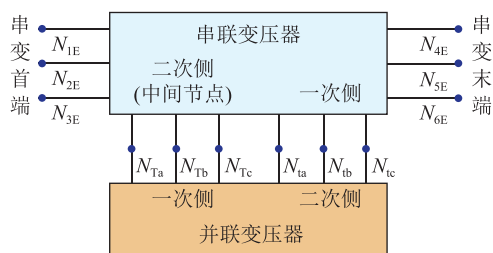


图 4 移相器建模整体结构

Fig.4 Overall structure of phase shift transformer modeling

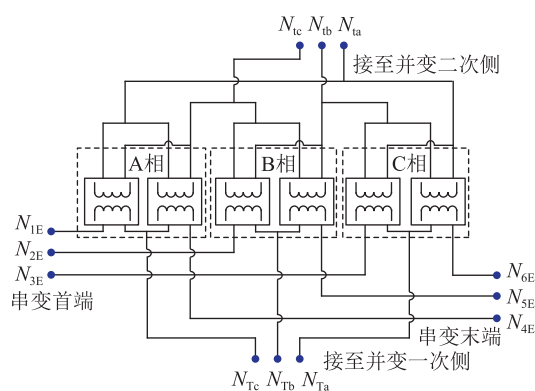


图 5 串联变压器模型整体结构

Fig.5 Overall structure of series transformer model

3 移相器动态调节性能分析

为验证文中建立的移相器电磁暂态模型的有效性, 同时掌握移相器的潮流调节特性, 基于 RTDS 平台建立图 7 所示的含移相器电网仿真算例, 电压等级为 220 kV, 电源与负荷通过 2 条长度和型号相同的 220 kV 线路连接, 其中移相器接入线路 1 参与潮流控制, 具体参数如表 1 所示。

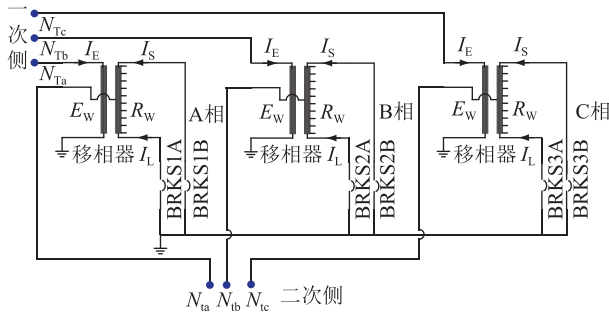


图6 并联变压器模型整体结构

Fig.6 Overall structure of shunt transformer

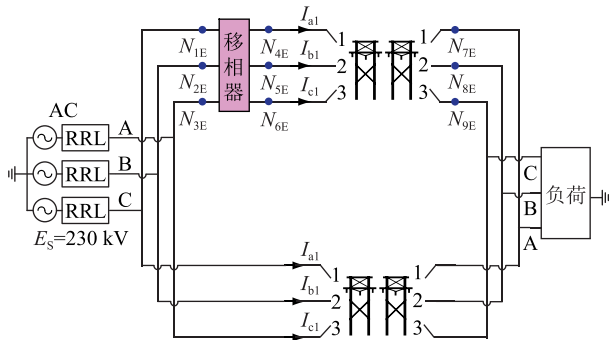


图7 电网仿真模型

Fig.7 Power grid simulation model

表1 移相器主要参数

Table 1 The main parameters of phase shift transformer

参数	数值
额定容量/(MV·A)	180
调节类型	对称
调节级数/级	±13
额定相角调节范围/(°)	±20
一次侧额定线电压/kV	60
二次侧额定线电压/kV	43
短路阻抗/%	8
连接组别	Y, D
一次侧额定线电压/kV	230
二次侧额定线电压/kV	60
连接组别	Y, Y

3.1 启动特性分析

移相器接入电网前后,线路潮流及电压变化情况见图8。移相器接入前,两回线路输送的有功功率均为78.55 MW;移相器接入后,受串联变压器漏抗影响,线路1等效阻抗增加,输送有功功率降低至76.48 MW,而线路2输送有功功率增加至81.64 MW。

3.2 调节特性分析

(1) 减少潮流输送。移相器接入电网后,移相角从0变化至20°,线路潮流及相关电压变化情况分别如图9和图10所示。

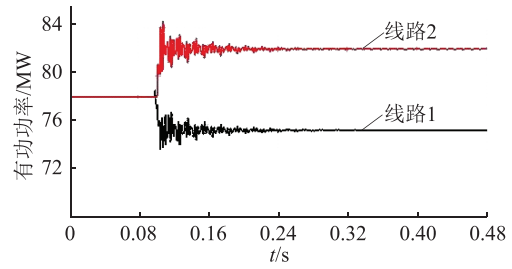


图8 移相器接入后线路有功功率变化

Fig.8 Change of transmission lines' active power after phase shift transformer is connected

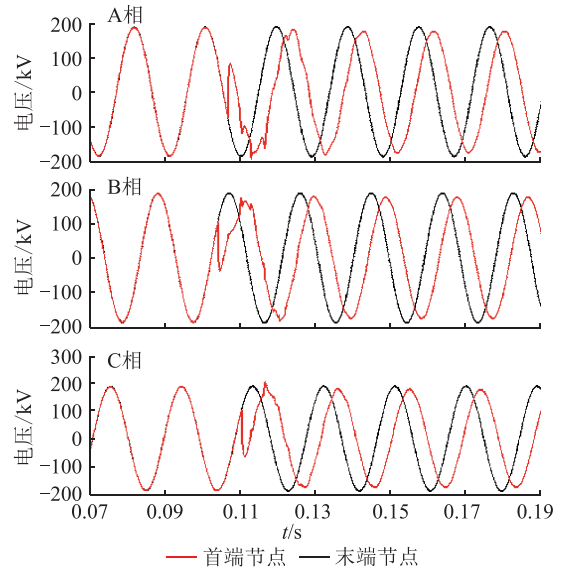


图9 串联变压器电压相角变化情况

Fig.9 Change of voltage angle variation of series transformer

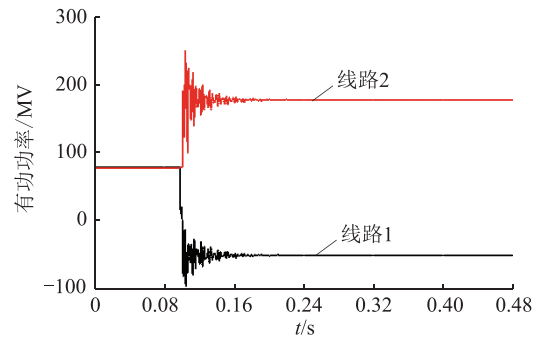


图10 移相器正向调节时线路有功功率变化情况

Fig.10 Change of transmission lines' active power when the phase shift transformer is adjusted forward

由图9可知,移相角度调节至20°时,首端节点L的三相电压明显滞后于节点S,导致移相器串入线路1的等效阻抗进一步增加,线路输送有功功率减少至-51.26 MW,同时,线路2输送有功功率则增加至176.7 MW。

(2) 增加潮流输送。移相器移相角度从20°变化至-20°时,线路潮流及相关电压变化情况见图11。

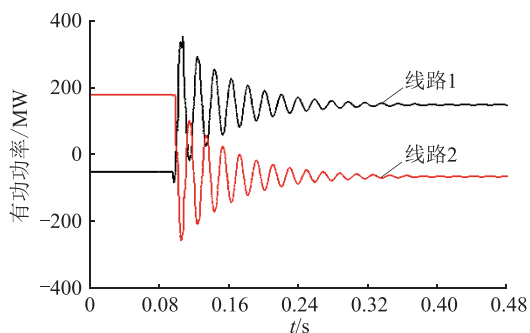


图 11 移相器反向调节时线路有功功率变化情况

Fig.11 Change of transmission lines' active power when the phase shift transformer is adjusted backward

分析图 11 可知,移相角度变化至 -20° 时,节点 L 的电压相角超前于节点 S,导致线路 1 等效阻抗降低,线路输送有功功率增加至 170.5 MW;线路 2 输送有功功率则降低至 -44.6 MW。同时,并联变压器一次侧 A 相电压相角始终位于串联变压器首末两端电压的中间位置,具体如图 12 所示。

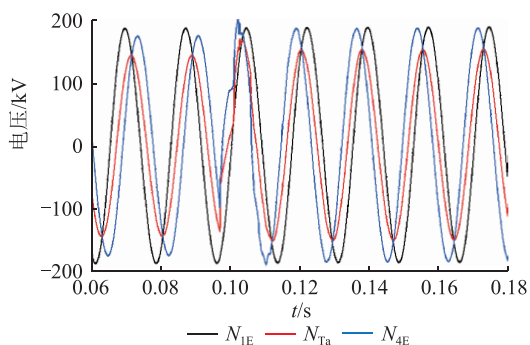


图 12 并联变压器一次侧 A 相电压与串联变压器两侧电压示意

Fig.12 Schematic diagram of A-phase voltage at primary side of shunt transformer and voltage at both sides of series transformer

通过上述仿真计算,证明了文中建立电磁暂态模型的正确性,通过移相器在 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 之间调节,可实现线路潮流在线路 1 和线路 2 之间的灵活分布,可根据电网实际需求进行潮流控制。

4 电网移相器的应用场景分析

随着特高压直流工程的投运及新能源并网规模的不断增加,我国电网跨区特高压落点、区内新能源消纳及负荷密集程度高等多种因素导致局部电网存在潮流通道受阻、电网受电能力不足等情况,具体如下:(1) 受负荷分布及电网结构特性影响,线路间潮流分布不合理,输变电设备在时间和空间上存在负载不均衡,重载线路限制电网供电能力提升,轻载线路导致设备利用率低;(2) 大规模可再生能源并网后,其自身的间歇性、随机性和波动

性导致部分输电设备在局部时段出现过载情况。

针对上述电网存在的潮流分布不均、供电能力提升受限的问题,移相器在电网中的应用场景总结为以下几种。

(1) 均衡输变电设备负载,提升电网受电能力。根据电网的实际运行情况,大部分 220 kV 分区电网存在 500 kV 主变负载不均衡情况(负载差 20% 以上),如负荷进一步增加,重载主变将出现过载,限制了分区电网受电能力;移相器调节可均衡主变负载,并在负荷增加过程中使主变负载保持均匀增加,从而实现分区电网受电能力的提升,具体如图 13 所示。

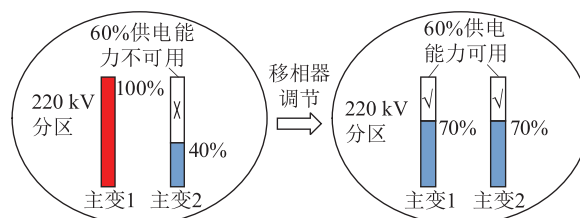


图 13 移相器提升电网供电能力示意

Fig.13 Schematic diagram of phase shifter to enhance power supply capacity of power grid

以东部某省 220 kV 分区电网为例,接线方式如图 14 所示,DS、LQ220 kV 母线短路电流超标,采取 DS—CX 单线的短路措施后,2 片电网仅通过 DS—JY—HN 链式通道相连,供电可靠性较差,DS、LQ 主变潮流不均衡,分区受电能力受限。

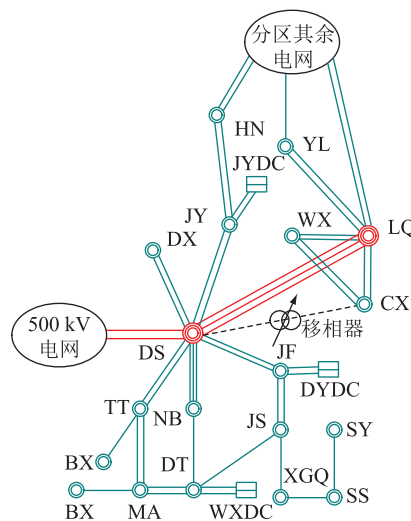


图 14 220 kV 分区电网示意

Fig.14 Schematic diagram of 220 kV district grid

考虑在 220 kV DS—CX 单线长新侧加装移相器,具体安装位置见图 14。移相器接入后,DS—CX 单线可恢复运行,220 kV 分区电网间有 DS—CX—LQ 和 DS—JY—HN 2 条通道相连,供电可靠性提升,通过移相器调节可均衡 DS 变电站和 LQ 变电站

下送功率,可提升电网受电能力 400 MW。

(2) 新能源并网潮流控制应用。大规模可再生能源并网后,其自身的间歇性、随机性和波动性导致电网既存在有功功率的控制问题,也可能由于输电通道的不足存在电能输送问题,通过加装移相器等装置可丰富潮流控制手段。

新能源大发期间,某东部电网有功潮流由 220 kV 电网输送至 500 kV 电网,其中,GR—BY—XC—JH—YD 通道输送潮流较多,如图 15 所示。

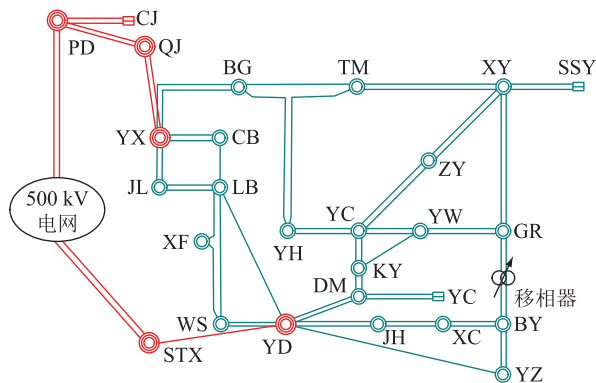


图 15 东部某 220 kV 分区电网示意

Fig.15 Schematic diagram of a 220 kV district grid in east

考虑在 GR—BY 双线 GR 站内加装移相器,通过移相器调节可消除 GR—BY 双线 N-1 过载问题,提升电网新能源消纳能力约 1 GW。

此外,移相器串联变压器漏抗相对线路阻抗较大,参与电网潮流控制的同时,可有效减小电网短路电流。

5 结语

文中从理论上分析了电网移相器调节电网潮流的原理,基于 RTDS 平台建立双芯对称型移相器的电磁暂态模型,并对移相器的投切运行和潮流调节时的控制特性进行仿真分析,掌握了移相器参与电网潮流调节时的控制特性,为移相器接入电网后的仿真计算奠定了基础。同时,总结了移相器在实际电网中的不同应用场景,经分析,通过移相器接入可解决输变电设备负载不均引起的供电能力受限、新能源消纳能力不足等问题。最后,探讨了移相器在电网中大规模推广应用的可行性。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“电网可控移相器(TCPST)拓扑结构及其关键参数优化技术研究”(J2019134)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] SREEJITH S, SIMON S P, SELVAN M P. Analysis of FACTS devices on security constrained unit commitment problem [J].

International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 66: 280-293.

[2] LUBURI Z, PANDI H. FACTS devices and energy storage in unit commitment [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104: 311-325.

[3] TAHER M A, KAMEL S, JURADO F, et al. Optimal power flow solution incorporating a simplified UPFC model using lightning attachment procedure optimization [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(1): 1-25.

[4] SHA Jiangbo, GUO Chunyi, REHMAN A, et al. A quantitative index to evaluate the commutation failure probability of LCC-HVDC with a synchronous condenser [J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 925.

[5] 郑宽, 沈沉, 刘锋. 降低多回 HVDC 同时换相失败风险的交直流混联受端系统 STATCOM 配置方案 [J]. 电网技术, 2018, 42(2): 564-570.

ZHENG Kuan, SHEN Chen, LIU Feng. Configuration scheme of STATCOM for mitigating simultaneous commutation failure risk of multi-infeed HVDC links [J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 564-570.

[6] 李晓栋, 张哲任, 徐政, 等. 具备潮流控制功能的组合式高压直流断路器 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 153-160.

LI Xiaodong, ZHANG Zheren, XU Zheng, et al. Integrated HVDC circuit breaker with power flow control capability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 153-160.

[7] 刘畅, 吴军, 郝露茜, 等. 基于直流潮流的 UPFC 优化配置研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 42-48.

LIU Chang, WU Jun, HAO Luxi, et al. Optimization configuration research of UPFC based on DC power flow [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 42-48.

[8] 陈登义, 李啸骢, 刘松. 多区域互联电力系统静止同步串联补偿器自适应反步滑模控制器设计 [J]. 电网技术, 2019, 43(1): 200-205.

CHEN Dengyi, LI Xiacong, LIU Song. Adaptive backstepping sliding mode controller design for multi-region interconnected power system with SSSC [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 200-205.

[9] 高本锋, 江婷, 于弘洋, 等. H 桥级联型 SSSC 的动态模型及小干扰稳定性分析 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 35-42.

GAO Benfeng, JIANG Ting, YU Hongyang, et al. Dynamic model and small interference stability analysis of H-bridge cascaded SSSC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 35-42.

[10] 钟亮民, 陈涵, 赵静波, 等. 基于集中控制的分布式潮流控制器策略研究 [J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 38-43.

ZHONG Liangmin, CHEN Xiong, ZHAO Jingbo, et al. Strategy research of distributed power flow controller based on centralized control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 38-43.

[11] 周宁, 张章, 梁涛, 等. 统一潮流控制器近端母线的短路电流计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 95-102.

- ZHOU Ning, ZHANG Zhang, LIANG Tao, et al. Short-circuit current calculation method for near-end bus of unified power flow controller [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 95-102.
- [12] 朱梓荣, 李群, 卫志农, 等. 含新型统一潮流控制器的电力系统安全校正模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 58-66.
- ZHU Zirong, LI Qun, WEI Zhinong, et al. Security correction model of power system with novel unified power flow controller [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 58-66.
- [13] 于弘洋, 周飞, 杨增辉. 可控移相器主电路参数设计及稳态特性分析[J]. 中国电力, 2013, 46(11): 36-41.
- YU Hongyang, ZHOU Fei, YANG Zenghui. Parameter design and steady state characteristic analysis of TCPSTs in a EHV-grid[J]. Electric Power, 2013, 46(11): 36-41.
- [14] 周飞, 于弘洋, 方万良, 等. 分级投切可控移相器稳态相量建模与分析[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3184-3189.
- ZHOU Fei, YU Hongyang, FANG Wanliang, et al. Steady state phasor modeling and analysis of hierarchically switched thyristor controlled phase shift transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3184-3189.
- [15] 申旭辉, 印永华, 卜广全, 等. 双输出移相器的建模研究[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 215-218.
- SHEN Xuhui, YIN Yonghua, BU Guangquan, et al. Research on modeling of dual output phase-shifting transformers [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 215-218.
- [16] 王德昌, 周启文, 丁峰峰, 等. 分级调节移相器的晶闸管触发角影响分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 121-126.
- WANG Dechang, ZHOU Qiwen, DING Fengfeng, et al. Analysis on thyristor firing angle influence of discrete regulated phase shifter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 121-126.
- [17] 杨旗, 班国邦, 谢百明, 等. 移相变压器应用于输电线路在线融冰方法与仿真研究[J/OL]. 电网技术: 1-7 [2020-09-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20200811.1729.002.html>.
- YANG Qi, BAN Guobang, XIE Baiming, et al. Research on the method and simulation of phase-shifting transformer for deicing on-load transmission lines[J/OL]. Power System Technology: 1-7 [2020-09-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20200811.1729.002.html>.

作者简介:



李群

李群(1967),男,博士,研究员级高级工程师,从事柔性潮流控制技术、FACTS技术在电力系统中的应用、新能源并网技术相关工作;

张宁宇(1985),男,博士,高级工程师,从事 FACTS技术在电力系统中的应用、电力系统优化与运行相关工作;

高山(1973),男,博士,副教授,研究方向为负荷预测、电力系统优化与运行。

Modeling and application scenario analysis of power phase shift transformer based on RTDS

LI Qun¹, ZHANG Ningyu¹, GAO Shan², LIU Jiankun¹, ZHOU Qian¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: As a mature power flow control device, power phase shift transformer can effectively balance the power flow distribution and improve the power supply capacity of power grid. It also has the advantages of low investment cost and high operation reliability. Firstly, the structure characteristics of phase shift transformer and the principle of power flow control are analyzed. Then, based on the real-time digital simulation platform, the detailed electromagnetic transient model of dual core symmetrical phase shift transformer is established. The power flow fluctuation and the control characteristics of the phase shift transformer are studied under the put-in situation and the power flow regulation mode respectively. The results show that the proposed model can effectively control the power flow distribution. Finally, according to the actual operation situation of power grid, the application scenarios of phase shift transformer in power grid are summarized, which provides reference for the large-scale application of power flow control technology in China's power grid.

Keywords: phase shift transformer; power flow control; real-time digital simulation; electromagnetic transient model; double core symmetrical type

(编辑 钱悦)