

基于可控变压器的新能源暂态过电压抑制方法

任冲¹, 柯贤波¹, 程林¹, 夏川淋², 赵荣臻², 卫琳¹

(1. 国家电网有限公司西北分部, 西安 710048; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 210000)

摘要: 当高比例新能源直流外送系统发生直流故障时, 系统无功扰动大但新能源无法提供有效支撑, 导致系统电压水平上升, 近区新能源消纳水平和直流外送功率相互影响制约。为解决上述问题, 提出一种基于可控变压器的新能源暂态过电压抑制方法, 利用直流电源控制变压器铁心饱和程度, 使其具备类似磁控电抗器的无功补偿功能, 从而抑制新能源机端过电压。首先论证了变压器作为感性无功源的可行性及可控性, 建立了基于励磁电流调节的变压器可控电抗的数学模型并设计了变压器励磁控制系统, 使变压器可以根据系统的电压水平自动控制铁心饱和程度, 以改变自身的无功功率从而抑制过电压。最后以青新疆电网天中直流近区新能源为算例, 验证了方法的有效性。
关键词: 特高压直流; 暂态过电压; 磁饱和变压器; 无功补偿

Transient Over-voltage Suppression Method of New Energy Based on Controllable Transformer

REN Chong¹, KE Xianbo¹, CHENG Lin¹, XIA Chuanlin², ZHAO Rongzhen², WEI Lin¹

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China;

2. NARI Electric Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: In case of DC fault of the DC transmission system with a high proportion of new energy, the large reactive power disturbance and weak effective support of the new energy lead to the rise of voltage level of the system and also mutual influence and restriction of the new energy consumption level and DC transmission power in the near area. For solving above problems, a kind of new energy transient over-voltage suppression method based on controllable transformer is proposed. The DC power supply is used to control the saturation degree of the transformer core, making it have the reactive power compensation function similar to the magnetic control reactor so as to suppress the over-voltage of the new energy generator terminal. Firstly, the feasibility and controllability of transformer as inductive reactive power source are demonstrated, and the mathematical model of transformer controllable reactance based on excitation current regulation is set up. The excitation control system of the transformer is designed so that the transformer can automatically control the saturation degree of the core in accordance with the voltage level of the system, change its reactive power and thus suppress the over-voltage. Finally, the effectiveness of the method is verified by the example of near DC area of Qinghai Xinjiang power grid.

Keywords: UHVDC; transient over-voltage; magnetic saturation transformer; reactive compensation

0 引言

“双碳”能源战略背景下, 新能源数量与规模不断增加, 其大量接入送端直流近区。然而新能源鲁棒性较差, 当发生故障时, 会在直流禁区产生比较严重的暂态过电压问题^[1-2], 从而发生新能源脱网事故^[3-4], 严重制约了直流送出能力。

当前直流故障后的暂态压升问题被广泛关注, 相关学者主要聚焦于两个方向。一是考虑通过对直流控保系统控制模式和参数控制来改良过电压特性^[6-8], 文献[9]通过优化相应的参数以降低故障期间无功不足问题。文献[10]为了找到对过电压灵敏度较高的参数, 分析了直流控制参数与过电压的关联特性。文献[11]提出了以延长直流闭锁的时间来

留足切除时间。这类方法可以起到一定的作用,然而直流系统控制参数影响全局稳定,难以优化,同时单纯增加闭锁时间会产生连锁故障^[12-13];二是考虑优化新能源机组的故障穿越切机策略^[14-15]。文献[16-18]为了实现无功支撑能力的提升,对故障穿越特性进行了优化,与之不同,文献[19]着眼于优化安控切机策略,而文献[20]提出主动吸收多余无功功率的方法,借助加装无功补偿设备实现过电压的抑制,在此之上,文献[21-22]对无功补偿设备的控制策略作了进一步的优化。上述方法往往需要对新能源场站进行改造升级,甚至重新规划,成本高昂^[23]。上述研究对抑制暂态过电压提供了一定参考,但未见实际应用。

直流故障下,新能源机端压升较为严重,应首先考虑利用新能源场站无功调节能力^[24-28],就地调节无功抑制过电压,但由于新能源场站无功补偿设备多为固定电容器,动态无功调节容量不足,难以有效抑制过电压水平^[2]。目前,有一种方案为加装分布式调相机,但分布式调相机造价高,运行维护成本大,增大了新能源发电企业负担。为此,亟需一种更稳定、迅速、可靠的动态无功补偿装置。

磁控式电抗器具备可靠性高、控制简单、价格低廉等优点而应用广泛^[29-34]。磁控电抗器利用磁饱和特性,让电抗连续平滑的随磁场强度改变而改变。电网中,变压器的等值电路模型为固定阻抗,可以将磁控电抗器的机理应用于变压器,使变压器在传输功率同时实现动态无功补偿。

基于此,本文提出附加磁控电抗器功能的新能源汇集变压器,利用直流源控制变压器铁心饱和程度,实现抑制新能源机端过电压的目标。首先针对新能源机端过电压特征,结合变压器的磁路饱和特性,将其作为感性无功源,建立了基于励磁电流调节的变压器可控电抗的数学模型。设计了包括检测部分、励磁电流控制环节的变压器励磁控制系统,使变压器可以根据系统的电压水平自动控制铁心饱和程度,调节变压器等效电抗,以增减无功功率,实现无功调节及过电压抑制功能。最后以某地区新能源为算例,验证了本文方法的有效性及其优越性。该方法工程实际运用意义较大,在推广实际应用,能有效、低成本缓解新能源场站侧暂态过电压问题,对提升近区风光外送水平以及助力实现“双碳”意义重大。

1 高占比新能源直流送出系统产生过电压机理

大规模风电直流送出系统无功补偿示意图见图1。如图1所示,新能源功率经过直流送出,当发生换相失败故障时,直流的输送能力急剧下降,无功也随之降低;当富余的感性无功进入交流系统时,会使交流母线电压越限。换相失败故障连续出现时变压器铁心迅速饱和,使其吸收无功更少,使过电压问题更严重。总的来说,当发生直流换相失败故障时,电压表现出先下降再上升的情况。

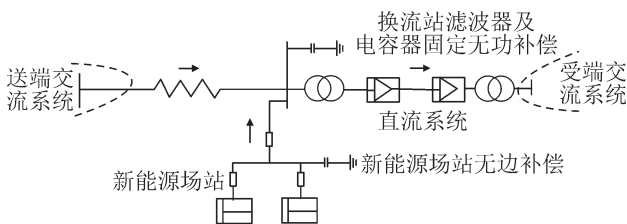


图1 大规模风电直流送出系统无功补偿示意图
Fig.1 Schematic diagram of reactive power compensation for large-scale wind power DC transmission system

换相失败故障的前期,过电压会先下降,此时新能源机组进入低穿状态,无此功能的机组会直接脱网。低穿和直接脱网对风机的有功功率都会有负面影响,这导致系统中多余的无功会进一步增加,这加剧了暂态压升的现象。

总体来说,新能源场站侧暂态过电压水平过高,主要是新能源机组无功调节、支撑能力较弱,加之系统无功冗余过大、新能源场站侧动态无功调节容量不足导致,需要提升新能源场站无功补偿能力抑制过电压水平。

2 变压器励磁电抗的可控调节原理

对于新能源场站侧暂态过电压的问题,由于变压器和磁控电抗器在结构上具有较高相似性,本文考虑将二者结合,让变压器兼具传输功率和动态无功补偿功能。为实现这一目的,首先需要分析变压器可控调节原理,变压器正常工作时,铁心始终不饱和,此时励磁电流几乎为0,这意味着常规变压器不具备无功补偿的能力。

但是,通过控制铁心饱和程度,改变励磁电纳 B_m ,就可以实现调整励磁电流及变压器励磁无功功率从而实现无功补偿调节的作用。

为了使铁心的磁饱和程度得以动态调节,本文的变压器的控制绕组为一次侧增加额外的绕组,如图2所示。为了获得更高的磁饱和控制的灵敏度,将变压器一次侧绕组铁心面积进行差异化设计,控

制绕组缠绕铁心面积应比正常铁心面积小,从而增大控制部分磁阻,提升控制灵敏度。此外,通过铁心面积差异化设计,能够改变变压器磁饱和特性,在发生暂态压升时,小截面铁心部分磁路饱和度会产生较大变化,使其在短时间内增大励磁电流,增大变压器吸收的无功,从而实现降低过电压幅值的目标。

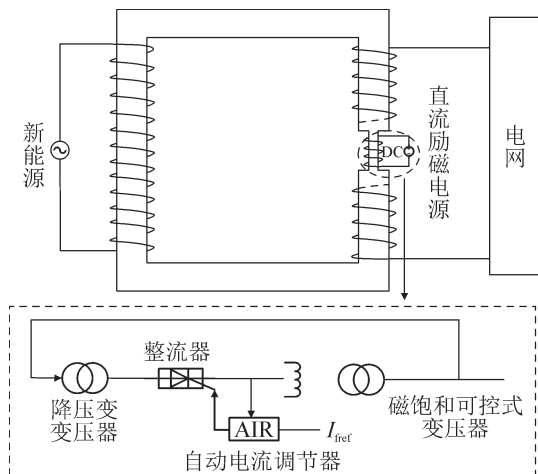


图2 直流励磁电源结构

Fig. 2 Structure of DC excitation power supply

同时为避免增加谐波含量,控制绕组采用直流电源控制。直流电源采用自励式静止直流电源,其结构见图2,由降压变压器、整流器、自动电流调节器构成。其中,变压器为整流器提供稳定交流电压,整流器进行整流,其触发角由自动电流调节器控制。电源以直流励磁电源参考值为输入,输出励磁电流,通过直流电源调节变压器饱和程度,进而改变变压器等效阻抗,从而实现调节整流器输出励磁电流 I_{ef} 的目的。

由于变压器二次侧电流大小只取决于所接电源大小,不受变压器励磁状态影响。因此对其无功补偿能力的分析的重点就是分析 I_{ef} 。变压器励磁电流 I_{ef} 和变压器一些参数的关系公式为

$$I_{ef} = \frac{B_s l}{4\pi N \mu_0} (\beta - \sin \beta) \quad (1)$$

$$\frac{dI_{ef}}{d\beta} = \frac{B_s l}{4\pi N \mu_0} (\beta - \cos \beta) \quad (2)$$

式中: β 为铁心饱和度; B_s 为磁感应强度; l 为磁路长度; N 为变压器匝数; μ_0 为变压器铁心磁化曲线。

由式(1)和(2)可以看出, $dI_{ef}/d\beta$ 恒大于零,励磁电流与铁心饱和度呈正比关系。通过控制励磁电流就可以控制铁心饱和度。

3 变压器励磁控制策略设计

变压器励磁控制系统见图3。如图3所示,变

压器结构为由检测部分、控制部分以及驱动部分构成。其中,电压检测装置检测当前的电压值,传送到控制环节,控制环节输出将调节量输出到调节直流励磁电源中改变励磁电流大小。

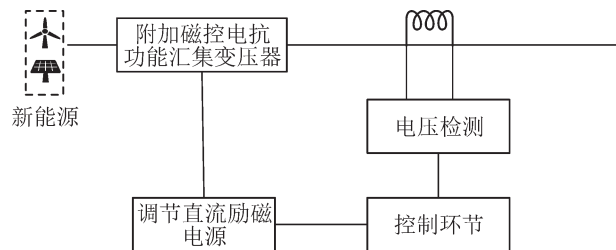


图3 变压器励磁控制系统

Fig. 3 Excitation control system of transformer

对变压器的控制,主要通过在控制环节内制定相关的控制策略来实现。控制了变压器铁心的饱和程度,电抗值会随之改变以补偿无功。控制环节见图4。

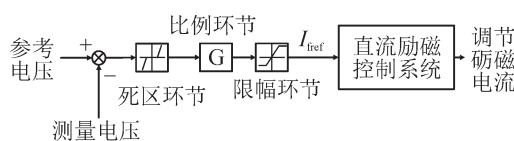


图4 磁饱和可控式变压器的控制策略

Fig. 4 Control strategy of magnetic saturation controllable transformer

如图所示,励磁电流控制部分主要包括死区环节、比例环节、限幅环节,通过电力测量装置检测出高压侧电压、电流瞬时值,与参考电压进行比较,由于本文所提磁饱和可控式变压器目标主要用于暂态电压抑制,要求在发生过电压时快速响应,迅速达到饱和,吸收大量无功,快速降低过电压峰值,而对调节精度要求不高,在正常电压波动范围时不应动作,为此需要设置一定死区,然后将差值通过死区环节,再通过比例环节进行放大;同时为避免输出电流过大,过渡保护,影响变压器寿命,需要设置限幅环节。将结果通过限幅环节就得到了电流指令值,将电流指令值输入到控制系统中产生触发脉冲使饱和变压器输出无功达到预定值。

通过上述的方法,变压器可以根据系统的电压水平连续地调节铁心饱和程度,调节等效电抗,以改变自身的无功功率,实现无功调节及过电压抑制功能。

4 仿真算例

本文以某地区的暂态过电压问题为例进行了分析。首先,在PSCAD中建立了包括某地区及近区网架和风力发电机的仿真模型。风力发电机的

容量设置为 120 MW。风力发电机通过双绕组变压器从 37 kV 至 230 kV 连接至某集气站,并通过 230 kV 升压至 750 kV 连接至 A 变电站,系统结构见图 5。

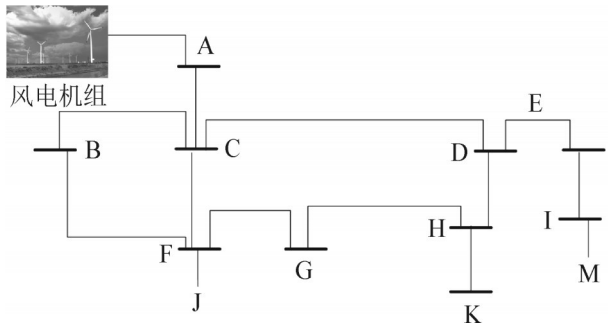


图5 仿真系统的结构
Fig. 5 Structure of simulation system

为了分析所提变压器设计方案抑制过电压效果,在 PSCAD 中建立了上述磁饱和可控式变压器模型,并替换接入 A 变的一台新能源汇集变为磁饱和可控式变压器。并针对直流换相失败期间,常规变压器和磁饱和可控变压器的过电压结果进行仿真对比,以验证磁饱和可控的变压器的性能。

在直流受端换流变近区设置三相短路接地故障置 0.2 s,造成送端电网直流发生换相失败,分析直流近区新能源机组过电压相关情况。

1)首先,分析故障下常规变压器与磁饱和可控式变压器的高压侧和低压侧电压变化。变压器两侧电压波形见图 6-7。

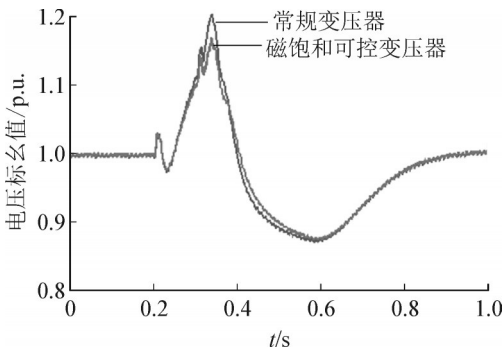


图6 变压器低压侧电压波
Fig. 6 Voltage waveform on low voltage side of transformer

如图 6 所示,当使用常规变压器时,故障时的低压侧即新能源机端暂态过电压上升到 1.204 p.u.,当采用磁饱和可控式变压器模型时,故障时的低压侧即新能源机端暂态过电压上升到 1.143 p.u.。当使用磁饱和可控式变压器时,过电压降低了 0.061 p.u.,降低幅度为 5.07%,接近一台分布式调相机动作效果^[24],如果近区风机大部分采用该变压器,将能够在故障期间大量吸收消耗冗余无功,从而可

有效避免新能源机组因机端压升过高脱网。

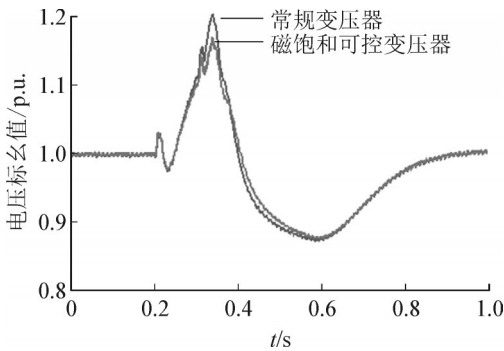


图7 变压器高压侧电压波形
Fig. 7 Voltage waveform on high voltage side of transformer

如图 7 所示,当使用常规变压器时,故障时的高压侧暂态过电压上升到 1.21 p.u.,当采用磁饱和可控式变压器模型时,故障时的高压侧暂态过电压上升到 1.179 p.u.。当使用磁饱和可控式变压器时,过电压降低了 0.031 p.u.,降低范围为 2.56%。

2)然后,分析故障下常规变压器与磁饱和可控式变压器的高压侧和低压侧无功功率变化。使用不同变压器时,两侧无功功率曲线见图 8-9。

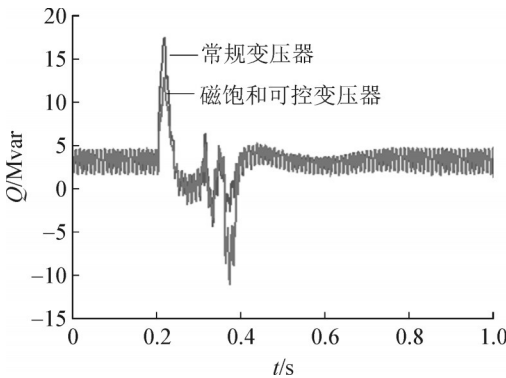


图8 变压器低压侧无功波形
Fig. 8 Reactive waveform on low voltage side of the transformer

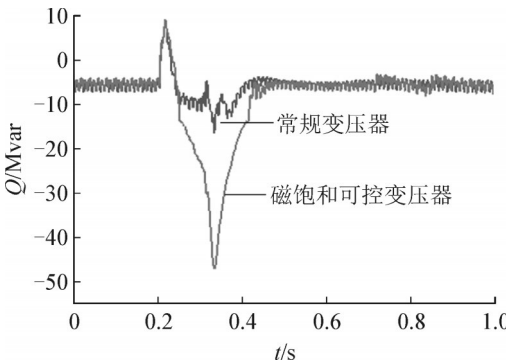


图9 变压器高压侧无功波形
Fig. 9 Reactive waveform on high voltage side of the transformer

如图 8 所示,当使用磁饱和可控式变压器时,

当故障导致电压升高时,变压器增大了无功功率的消耗,甚至吸收了无功,对抑制过电压起到了明显的作用。

如图9所示,当使用磁饱和可控式变压器时,当故障导致电压升高时,变压器明显降低了无功功率消耗。

3)最后,分析了故障下风电机组机端的交流母线电压,风力发电机机端母线电压波形,见图10。

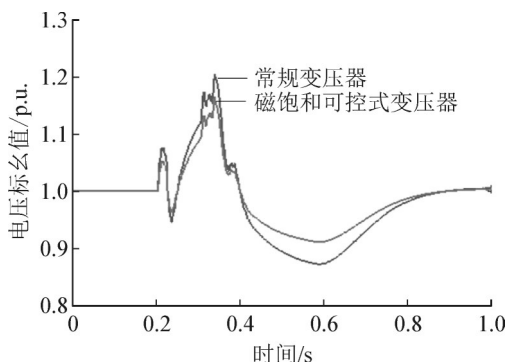


图10 风力发电机终端母线电压波形

Fig. 10 Voltage waveform of wind turbine generator terminal bus

当采用磁饱和可控式变压器时,与常规变压器相比,发电机端电压从1.204 p.u.降至1.165 p.u.,过电压下降0.398 p.u.,下降幅度为3.24%。

5 结语

本文提出一种可控磁饱和式新能源汇集变压器,利用直流电源控制变压器铁心饱和程度,使其在承担新能源功率汇集传输的基础上,具备类似磁控电抗器的快速无功补偿功能,如果近区风机大部分采用该变压器,将能够在故障期间大量吸收消耗冗余无功,从而可有效避免新能源机组因机端压升高脱网,实现抑制新能源机端过电压的目标。

针对交直流故障后新能源机端暂态过电压特征,论证了变压器可以起到感性无功源的作用,设计了变压器励磁控制系统,包括检测部分、励磁电流控制环节,使变压器可以根据系统的电压水平自动控制铁心饱和程度,改变变压器等效电抗,以改变自身的无功功率,实现快速无功调节及过电压抑制功能。最后以某地区新能源暂态过电压为算例,验证了方法的有效性及优越性。

参考文献

- [1] 赵宏博,姚良忠,王伟胜,等. 大规模风电高压脱网分析及协调预防控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 43-48.
ZHAO Hongbo, YAO Liangzhong, WANG Weisheng, et al. Outage analysis of large scale wind power under high volt-

age condition and coordinated prevention and control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 43-48.

- [2] 杜维柱,罗亚洲,李蕴红,等. 风电汇集系统无功盈余导致暂态过电压问题的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3224-3239.
DU Weizhu, LUO Yazhou, LI Yunhong, et al. Reviews of transient overvoltage problem cause by extra reactive power in large scale wind power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3224-3239.
- [3] 崔晓丹,吴家龙,雷鸣,等. 新能源高占比电力系统的连锁故障诱因及事故链搜索技术探讨[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 135-143.
CUI Xiaodan, WU Jialong, LEI Ming, et al. Discussion on inducement and fault chain search technology of cascading failure in power system with high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 135-143.
- [4] 秦世耀,姜蓉蓉,刘晋,等. UHVDC闭锁引发风电场暂态过电压分析及HVRT协调控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 63-69.
QIN Shiyao, JIANG Rongrong, LIU Jin, et al. Transient overvoltage analysis of wind farm with UHVDC block and HVRT coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 63-69.
- [5] 李昂洋,晁璞璞,徐式蕴,等. 风电经特高压直流送出系统的暂态过电压问题研究综述[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 26-35.
LI Boyang, CHAO Pupu, XU Shiyun, et al. Review on transient overvoltage issues of wind power transmission system via UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 26-35.
- [6] 王熙纯,刘纯,林伟芳,等. 风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4612-4621.
WANG Xichun, LIU Chun, LIN Weifang, et al. Influence of wind turbine fault ride-through characteristics on transient overvoltage of large-scale wind power DC transmission systems and parameter optimization [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4612-4621.
- [7] 李光辉,王伟胜,何国庆,等. 风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(三):送端风电机组暂态过电压抑制措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5079-5089.
LI Guanghui, WANG Weisheng, HE Guoqing, et al. Commutation failure of UHVDC system for wind farm integration (part III): transient overvoltage suppression measures of wind powers in sending terminal grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5079-5089.

- [8] 杨大业, 项祖涛, 马世英, 等. 新能源接入系统暂态过电压产生机理及主要影响因素[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(3): 127-134.
- YANG Daye, XIANG Zutao, MA Shiyong, et al. Mechanism and main influencing factors of transient over-voltage in new energy access system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(3): 127-134.
- [9] 冀肖彤. 抑制 HVDC 送端交流暂态过电压的控制系统优化[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 721-728.
- JI Xiaotong. Optimization of control system to suppress AC transient overvoltage at HVDC transmission[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 721-728.
- [10] 罗煦之, 张健, 贺静波, 等. 计及暂态过电压约束的直流闭锁安控与极控协调控制研究[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2526-2531.
- LUO Xuzhi, ZHANG Jian, HE Jingbo, et al. Coordinated control research of stability control system and pole control system under DC system block considering transient over-voltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2526-2531.
- [11] 郑超, 霍超, 摆世彬, 等. 基于实际工程控制系统的直流受扰特性分析——电压快速波动下整流端特性及其优化[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 304-313.
- ZHENG Chao, HUO Chao, BAI Shibin, et al. Analysis on disturbance characteristics of HVDC based on actual engineering control system—disturbance characteristics of rectifier side and its optimization[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 304-313.
- [12] 韩平平, 陈凌琦, 胡迪, 等. 直流闭锁暂态过电压对风电外送影响及其抑制措施[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 99-105.
- HAN Pingping, CHEN Lingqi, HU Di, et al. Impact of DC blocking transient overvoltage on wind power transmission and its suppression measures[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 99-105.
- [13] 邱威, 贺静波, 樊小伟, 等. 应对特高压直流大扰动的稳定措施综述[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3049-3067.
- QIU Wei, HE Jingbo, FAN Xiaowei, et al. Overview on stability measures for large disturbances of UHVDC[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3049-3067.
- [14] 王德胜, 颜湘武, 刘辉, 等. 基于动态无功支撑的全功率变流风电机组高压穿越改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 957-967.
- WANG Desheng, YAN Xiangwu, LIU Hui, et al. High voltage ride through improved control of full power converter wind turbines based on dynamic reactive power support[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 957-967.
- [15] 刘辉, 王阔. 新能源低电压穿越无功电流对暂态电压安全约束的影响[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 152-158.
- LIU Hui, WANG Kuo. LVRT reactive current index of renewable units based on the constraints of transient voltage[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 152-158.
- [16] 姜惠兰, 王绍辉, 李希钰, 等. 考虑动态电压区间无功支撑的双馈风机连锁故障穿越控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 147-155.
- JIANG Huilan, WANG Shaohui, LI Xiyu, et al. Cascading fault ride-through control strategy for doubly-fed wind turbines considering reactive power support in dynamic voltage range[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 147-155.
- [17] 郑超, 林俊杰, 赵健, 等. 规模化光伏并网系统暂态功率特性及电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1059-1071.
- ZHENG Chao, LIN Junjie, ZHAO Jian, et al. Transient power characteristic of scaled photovoltaic grid-connected system and its voltage control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1059-1071.
- [18] 陈厚合, 鲁华威, 王长江, 等. 抑制直流送端系统暂态过电压的直流和风电控制参数协调优化[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 46-55.
- CHEN Houhe, LU Huawei, WANG Changjiang, et al. Coordinated optimization of HVDC and wind power control parameters for mitigating transient overvoltage on HVDC sending-side system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 46-55.
- [19] 袁森, 陈得治, 罗亚洲, 等. 直流闭锁冲击弱交流通道的稳定特性及多资源协调控制措施[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 203-210.
- YUAN Sen, CHEN Dezhi, LUO Yazhou, et al. Stability characteristics and coordinated control measures of multi-resource for DC blocking fault impacting weak AC channel[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 203-210.
- [20] WANG Chunheng, FU Yong. Fully parallel stochastic security-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3561-3571.
- [21] 朱丽萍, 刘文颖, 邵冲, 等. 基于调相机与 SVC 协调的抑制高压直流送端风机脱网的控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 107-113.
- ZHU Liping, LIU Wenying, SHAO Chong, et al. Control strategy of suppressing wind turbine tripping based on coordination between synchronous condenser and SVC in sending-end network of HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 107-113.
- [22] 赵亚清, 刘青, 谢欢, 等. 考虑源网协调的风电场动态无功补偿装置控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 118-123.
- ZHAO Yaqing, LIU Qing, XIE Huan, et al. Dynamic reactive power compensator control considering source-grid co-

- ordination for wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 118-123.
- [23] UPADHYAY A, HU Bingqian, LI Jie, et al. A chance-constrained wind range quantification approach to robust scuc by determining dynamic uncertainty intervals[J]. CSEE Journal of Power And Energy Systems, 2016, 2(1): 54-64.
- [24] 皇甫成, 郭金智, 贾非, 等. 一种考虑新能源出力相关性及不确定性的分布式发电规划策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(3): 105-110.
- HUANGFU Cheng, GUO Jinzhi, JIA Fei, et al. A distributed generation planning strategy considering the correlation and uncertainty of renewable energy output[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(3): 105-110.
- [25] WU Hongyu, KRAD I, FLORITA A, et al. Stochastic multi-timescale power system operations with variable wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3325-3337.
- [26] 王华昕, 刘美娜, 褚启迪. 计及长线路参数扰动的新能源黑启动工程分析[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 99-107.
- WANG Huaxin, LIU Meina, CHU Qidi. Analysis of new energy black start-up engineering considering parameter perturbation of long line [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 99-107.
- [27] 刘浩芳, 朱艺颖, 刘琳, 等. 新能源机组的电网强度适应性及暂态响应特性测试方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 179-185.
- LIU Haofang, ZHU Yiyang, LIU Lin, et al. Test scheme for power grid strength adaptability and transient response characteristics of renewable energy unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 179-185.
- [28] 胡亚平, 聂涌泉, 何宇斌, 等. 基于ELM预测模型的高比例新能源电网改进频率控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 98-106.
- HU Yaping, NIE Yongquan, HE Yubin, et al. Improved frequency control strategy for power grid with high proportion of renewable energy based on ELM prediction model[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 98-106.
- [29] 邢军强, 张耘硕, 钟俊涛, 等. 基于对偶性的多柱式磁控并联电抗器建模新方法[J]. 变压器, 2022, 59(8): 15-22.
- XING Junqiang, ZHANG Yunshuo, ZHONG Juntao, et al. New method for modeling multi-limb magnetically controlled shunt reactor based on duality[J]. Transformer, 2022, 59(8): 15-22.
- [30] 姜言金, 刘栩霏, 徐晓东, 等. 基于多场耦合的变压器直流偏磁噪声异常表征[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 11-19.
- JIANG Yanjin, LIU Xufei, XU Xiaodong, et al. Anomaly characterization of transformer DC bias noise based on multi-field coupling[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 11-19.
- [31] 马云龙, 李秀广, 周秀, 等. 基于高压真空快速断路器的变压器励磁涌流抑制技术研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 136-142.
- MA Yunlong, LI Xiuguang, ZHOU Xiu, et al. Research on excitation inrush current suppression technology of transformer based on high voltage vacuum fast circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 136-142.
- [32] 郑嘉禧, 王国庆, 林博勇, 等. 中压变压器保护用熔断器小电流熔断特性的试验研究[J]. 电器与能效管理技术, 2022(7): 1-6.
- ZHENG Jiayi, WANG Guoqing, LIN Boyong, et al. Experimental study on low current fusing characteristics of fuse for medium voltage transformer protection[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(7): 1-6.
- [33] 沈剑韬, 刘伟, 刘毅, 等. 配电变压器状态监测技术应用研究[J]. 变压器, 2023, 60(2): 45-48.
- SHEN Jiantao, LIU Wei, LIU Yi, et al. Application research on condition monitoring technology of distribution transformer[J]. Transformer, 2023, 60(2): 45-48.
- [34] 都兴双, 李洪春, 苏晓龙, 等. 高阻抗变压器内置电抗器的抗短路能力计算及绕组热点分析[J]. 变压器, 2023, 60(3): 7-11.
- DU Xingshuang, LI Hongchun, SU Xiao-long, et al. Short-circuit resistance capacity analysis and winding hot spot calculating of high impedance transformer built-in reactor[J]. Transformer, 2023, 60(3): 7-11.

作者简介:

任冲(1984—),男,正高级工程师,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail: 119074735@qq.com。

柯贤波(1979—),男,正高级工程师,主要研究方向为电网运行与控制。

程林(1982—),男,正高级工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

夏川淋(1997—),男,工程师,主要研究方向为电力系统运行分析与控制。

赵荣臻(1995—),男,工程师,主要研究方向为电网稳定分析。

卫琳(1980—),女,高级工程师,主要研究方向为电力系统运行控制。