

风电经特高压直流送出系统的暂态过电压问题研究综述

李帛洋¹, 晁璞璞¹, 徐式蕴², 李卫星¹, 刘新元³, 李志民¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 3. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

摘要:大规模风电通过特高压直流线路外送时,换相失败、直流闭锁等故障引发的暂态过电压问题严重影响了系统的安全稳定运行,制约了系统的输电能力。针对风电经特高压直流送出系统暂态过电压问题的研究步骤和关键技术挑战,从系统仿真建模、暂态过电压根源解析、抑制策略设计3个方面,分别进行总结和综述:从大规模风电经特高压直流送出系统的仿真建模出发,梳理、评述了各主要部分的建模方法及其优缺点;阐述了2类典型暂态过电压的演化过程,解析了其产生根源、影响因素及量化分析方法;根据控制策略的实施对象,从系统级保护控制、直流系统控制、风电集群控制、无功补偿控制等方面,对比分析了各种控制方法的优势与不足。分别针对上述3个方面梳理总结了现有成果并对研究趋势进行了展望,以期大规模风电经特高压直流外送系统的故障穿越控制提供依据。

关键词:大规模风电;特高压直流;暂态过电压;控制策略

中图分类号:TM 614; TM 721.1; TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202111019

0 引言

现阶段我国风能资源与负荷中心总体上呈逆向分布,“三北地区”丰富的风能资源通过特高压直流(UHVDC)输电系统进行大规模、远距离输送^[1]。目前,我国已建成超过10回±800 kV及以上电压等级的特高压直流线路,未来还将有数回特高压直流投运^[2]。然而,特高压直流输电系统在带来巨大经济效益的同时,也存在一系列的安全问题。尤其是当特高压直流发生换相失败、直流闭锁等故障时,换流站内盈余的无功倒送入交流系统将引起送端近区电压显著升高,超出系统正常运行的电压允许范围,造成暂态过电压问题^[3-5]。暂态压升超过风机变流器耐压限值将导致风机脱网甚至连锁脱网,严重时会造成整个系统崩溃。现阶段锡泰、扎青、青豫、吉泉等特高压直流输电工程均面临较为严重的暂态过电压问题,其输电能力受到制约^[6-9]。因此,制定合理的控制策略以限制暂态过电压对确保设备安全、提升线路输电能力、维持系统安全稳定运行具有重要的意义。

为了有效抑制暂态过电压,需要建立能够反映实际系统动态响应特性的电磁暂态仿真模型,解析暂态过电压的产生机理及影响因素,梳理有助于抑

制过电压的关键可控环节和参数,制定合理的控制策略从而达到抑制暂态过电压的目的。因此,暂态过电压问题的研究关键在于系统仿真建模、暂态过电压根源解析和抑制策略设计。本文将从上述3个方面出发,对大规模风电经特高压直流送出系统的暂态过电压问题进行评述。

1)系统仿真建模。对特高压直流输电系统、大规模风电集群及动态无功补偿设备等组成部分的建模方法进行梳理与评述,对比分析各类建模方法的优缺点,指出提升模型精度的研究方向。

2)暂态过电压根源解析。阐述2类典型暂态过电压的演化过程,解析其产生根源及影响因素,梳理暂态过电压水平与各影响因素之间的量化分析方法,指出提升分析精度的有效途径。

3)暂态过电压抑制策略设计。从系统级保护控制、直流系统控制、风电集群控制、无功补偿控制等方面,对目前各种过电压抑制策略进行评述,分析各类方法的优势与不足,提出各组成部分协同控制的可行方案。

1 大规模风电经特高压直流送出系统的仿真建模方法

大规模风电经特高压直流送出系统通常为复合型外送系统,即将大规模风电与配套火电通过特高压直流输电系统进行联合外送。系统通常包含风电集群、同步机组、直流系统、无功补偿设备等多个组成部分,有时还需要考虑送受端交流电网系统、多样化负荷等环节,规模庞大,结构复杂。系统的暂态过电压问题是多时间尺度和多样化装备响应特性的综合作用,难以建立微分方程进行解析求解,而主要采

收稿日期:2021-08-08;修回日期:2021-11-11

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(风电经特高压交直流联合外送系统暂态过电压分析及抑制)(5100-202015010A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Analysis and Suppression of Transient Overvoltage of Wind Power Transmission System via UHVAC / UHVDC)(5100-202015010A-0-0-00)

用时域仿真方法进行分析。建立能够反映系统各环节实际响应特性的仿真模型,是分析系统暂态过电压特性、制定合理控制策略的前提和基础。

1.1 特高压直流输电系统建模方法

特高压直流输电系统是风电大规模外送的核心组成部分,其模型的精细化程度是影响过电压现象仿真精度的主要因素。本节通过梳理已有研究中采用的特高压直流输电系统模型,从模型结构、模型参数和控制策略3个方面,分析总结了各模型的优缺点和选用依据,如表1所示。

表1 特高压直流输电系统模型

Table 1 Models of UHVDC transmission system

分类依据	建模方法	优点	缺点
模型结构	电磁暂态	精度高	计算量大,效率低
	机电暂态	仿真速度快	不适用于非对称故障
模型参数	典型参数	应用广泛,易于比较	指标明显落后
	实际参数	针对性强,结果精确	建模复杂,通用性差
控制策略	通用策略	逻辑清晰,简单有效	欠缺细节
	基于实际工程	功能完善,特性准确	结构复杂

在模型结构方面,文献[10-12]采用详细的电磁暂态模型,考虑晶闸管换流阀的开关过程,能够更加准确地反映暂态过程中各换流阀电压、电流等状态量的变化过程,在分析非对称故障、换相失败暂态过程等问题时精度较高。但由于模型复杂、计算量大,在分析大规模系统时效率不高。文献[3,13-14]采用简化的机电暂态模型,将换流器作为一个整体用准稳态方程描述其输入输出特性,计算量小,仿真速度快。但准稳态方程缺乏对开关过程的描述,无法反映换流阀的工作过程。准稳态建模需要满足换流母线三相电压平衡、换流器对称运行等假定条件^[15],不适用于研究非对称故障场景。

在模型参数方面,文献[16-18]采用国际大电网会议(CIGRE)高压直流标准测试系统(拓扑结构示意图如附录A图A1所示)参数,该系统包含单极500 kV / 1000 MW 输电线路参数和极控策略,能够模拟高压直流输电系统的典型特性。该系统被提出的时间较早,结构简单、控制策略清晰,被国内外专家学者广泛采用,基于其分析所得各类现象的可信度高,结论成熟可靠,一般作为标准模型用于控制策略的设计、测试与分析。而目前我国特高压直流线路的电压等级已达到 ± 800 kV和 ± 1100 kV,标准测试系统的各项指标已明显落后,与实际系统差别较大。文献[11-12,19]对标准测试系统进行了一定程度的改进,基于原有系统框架和控制逻辑,提升了电压和功率等级,并对线路、滤波器等参数进行了优化。改进后的模型更接近真实直流线路,仿真准确性得到进一步提升。除上述典型系统参数外,文献

[10,20-21]基于特定实际直流输电工程建立仿真模型,采用了真实参数,针对性强,仿真结果更为精确,但该建模方法的工作量大,通用性差,适用于分析和验证特定工程问题。

在控制策略方面,大多研究采用的是通用控制策略^[16-19],包含直流系统的核心控制环节。附录A图A2给出的特高压直流系统简化控制结构中,整流侧采用最小触发角/定电流控制,逆变侧采用定电流/定熄弧角控制,辅以电流偏差控制和低压限流控制。此外,定功率控制、定电压控制、换相失败预测等也是常用的控制环节。通用控制策略的逻辑清晰,能够实现基本的控制功能,便于在此基础上对控制算法进行改进。但模型特性与实际系统仍有较大的差距,要提高仿真准确度需要采用更接近实际控制器的控制策略。文献[3,22]基于ABB实际控制系统搭建了直流控制器,文献[23]采用了基于实际工程的直流系统控制器,文献[24]在数模混合仿真平台中接入了与实际直流输电工程相同的控保模块。相比于通用控制策略,采用基于实际工程控制器的控制策略^[22-24]的逻辑更完整,功能更全面,能够更好地反映系统受控特性。

在直流输电系统建模过程中,现有研究大多采用基于标准测试系统的模型辅以通用控制策略,研究结论对实际系统的指导作用较有限。在对实际直流输电系统进行建模时,建议参照标准测试系统,根据研究需求,有针对性地对直流系统的模型结构、模型参数及控制策略进行建模和简化。

1.2 大规模风电集群建模方法

在系统安全稳定运行的前提下,消纳风电是大规模风电经特高压直流送出系统的主要目标。然而,大规模风电集群通常包含数百台风电机组,如果对每台风电机组都进行详细建模,会大幅增加模型复杂度和计算时间,甚至会面临“维数灾”问题。因此,对风电集群进行等值建模十分重要。目前,风电集群的等值建模方法主要通过减台数和降阶数2种途径实现,如表2所示。

表2 风电集群等值建模方法对比

Table 2 Comparison of equivalent modeling methods for wind power cluster

实现途径	等值方法	优点	缺点
减台数	单机等值	无需分群,计算简单	当机组运行工况差异较大时,精度差
	多机等值	精度高,特性准确	需要识别分群指标,分群算法复杂
降阶数	机电暂态	计算速度快	精度低
	电磁暂态	精度高,特性准	计算量大,效率低

减台数即将风电集群/风电场用1台或多台等值机表征,被称为单机等值方法^[25-27]或多机等值方法^[28-29]。单机等值方法无需对机组进行分群,将整

座场站等值为1台机组。文献[25]采用电流倍乘法,风电场采用单机模型经箱式变压器后出口电流倍乘方式进行等值,但未考虑实际风电场内机组运行工况的多样性;文献[26]采用参数聚合法,将风电场等值为1台等值机;文献[27]在风机参数等值基础上还对风速进行了等值计算。但上述研究均无法表征场站内各机组动态行为的差异,当机组间的运行工况差异较大时,会导致较大的等值误差。

多机等值方法基于传统的发电机“同调”思想,通常以能够表征机组运行状态的特征量为分群指标,将具有相似或相同运行点的机组聚合为1台等值机。文献[28]采用K中心点聚类法根据风速对风电场进行聚类,将每座风电场等值为2台机组;文献[29]采用同调机群识别聚类方法确定风电场内机组的同调风电机组,将每个同调风电机组等值为1台机组。这类方法虽然可以达到较高的等值精度,但涉及复杂的分群算法和集电网络在不同等值机间的分摊等复杂环节,实用性较差。

降阶数一般通过忽略对研究对象无影响或影响较小的动态,实现等值机电磁暂态模型^[24-26]的进一步简化。电磁暂态模型的时间尺度小,包含了换流器的详细特性,但由于模型阶数高,计算量大,仿真效率低。文献[30-31]分别基于电力系统计算机辅助设计PSCAD(Power Systems Computer Aided Design)、数字仿真和电网计算程序DIGSILENT(Digital Simulation and Electrical Network)平台搭建了风电集群的机电暂态模型,忽略了换流器的开关过程,计算量小,仿真速度快,但由于建模精细程度有限,无法准确反映风电集群在扰动过程中的详细动态特性;文献[3, 14]采用电力系统分析综合程序PSASP(Power System Analysis Synthesis Program)、电力系统分析软件PSD-BPA(Power System Department-Bonneville Power Administration)等平台中的风电机组通用模型,这类模型的集成度高,且易于使用,但由于模型已经固化,在控制策略等方面可供修改的空间较为有限。

目前,关于减台数途径,单机等值方法的精度较低,多机等值方法尚没有被广泛认可的分群指标,且对风电机组故障穿越特性的考虑还不够充分;关于降阶数途径,大多采用机电暂态模型或通用模型,没有考虑集电网络的影响。现有研究存在的共性问题在于:没有考虑系统暂态过电压问题对风电模型的实际需求,只是简单地移植了现有风电机组等值建模方法。在直流系统发生故障期间,系统暂态电压的响应时间尺度在毫秒级别,因此,在对风电集群建模时,采用电磁暂态模型更为合适。同时应充分考虑系统暂态过电压问题与风电故障穿越特性的交互作用,根据其对应风电模型响应特性的精细化程度需

求,兼顾精度和计算量,建立合理有效的风电集群电磁暂态等值模型。

1.3 其他组成部分的建模方法

除风电集群和直流输电系统外,风电经特高压直流送出系统还包括同步发电机组、送端交流电网、动态无功设备等部门。

目前,同步发电机组的建模技术已相对成熟,本文不再详述。对于送端交流电网的建模,常用方法是将其等效为基于短路比的等效电源和阻抗^[12,26],短路比参数既可以根据需求设定,也可以基于短路电流计算结果得到^[27],这种等效方法既能反映送端交流电网的强度,又能减少建模复杂度和计算量。文献[25]采用基于实际电网结构的交流电网模型,这种建模方法虽然较繁琐,但是可以更好地反映实际系统的特性,常用于对实际工程问题的验证。动态无功设备主要包括静止无功补偿装置SVC(Static Var Compensator)、静止无功发生器SVG(Static Var Generator)和同步调相机等,通常根据系统建模时间尺度建立其对应的机电或电磁暂态模型,辅以通用或优化控制策略参与系统的无功调节^[11,32-34]。

1.4 系统仿真建模方法研究展望

已有研究大多采用CIGRE标准测试系统或其改进模型对特高压直流输电系统进行建模;对于机组数量众多、随机性和不确定性突出的风电集群而言,大多采用运行于额定工作点的单机等值模型;对于其他组成部分,通常也只是简单地移植通用模型进行建模。已有研究普遍没有深入分析其采用的建模方法是否能够真实地反映对应的电网设备在故障穿越全过程中的动态响应特性,这也正是系统仿真建模的难点所在。以风电集群为例,建议详细分析不同类型风电机组在不同运行状态、不同故障场景下的暂态特性,特别是低-高电压连锁故障期间的暂态行为,挖掘风电集群内多样化机组动态行为的一致性、差异性及其影响因素和机理,针对不同场站规模和集电网络形式,研究风电机组在各故障穿越过程中的电磁暂态行为通过复杂汇集网络耗散后的演变规律,结合实际工程对建模的精细化程度需求,建立能够兼顾精度和计算量的风电集群电磁暂态等值模型。

2 暂态过电压根源解析

为了更好地解析风电经特高压直流送出系统暂态过电压现象产生的原因,本文基于CIGRE标准测试系统,在PSCAD平台中搭建了相应的仿真模型。仿真分析结果表明,送端换流母线暂态过电压的典型响应特性可分为2类^[3,14,35-38],具体如图1所示。图中,电压为标么值。

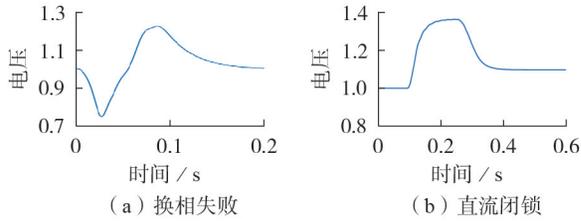


图1 送端换流母线暂态过电压曲线
Fig.1 Transient overvoltage curves of sending-end converter bus

2.1 暂态过电压现象产生的原因

图1(a)所示电压响应特性曲线主要由换相失败故障引起:受端换流器发生换相失败后,受端直流电压快速下降,直流电流随之升高,送端电流控制器增大触发角以抑制电流上升,无功消耗迅速增加,造成送端换流母线电压降低;之后在低压限流控制器的调节作用下,直流电流迅速减小,送端无功消耗随之大幅降低,送端交流滤波器组的大量过剩无功引起送端换流母线出现暂态过电压。

图1(b)所示电压响应特性曲线主要由直流闭锁故障引起:直流线路闭锁后,单极或双极线路有功功率在短时间内迅速降至0,大量过剩无功导致送端交流电压快速升高,在送端滤波器组切除前会维持过电压状态。文献[39]还指出,对于一些无功损耗大幅增加的非常规工况而言,发生故障时的过电压明显高于常规工况下的电压。故障期间系统送端的无功失衡是导致暂态过电压的根源所在。

除无功功率过剩这一原因外,文献[14]指出,换流站近区的暂态过电压水平与换流站的短路容量、近区无功-电压控制能力和极控与安控动作时序密切相关,一旦极控切滤波器时间与安控切机时间匹配不当,就可能进一步加剧暂态过电压水平;文献[40]将系统发生扰动后的电压动态过程分为2个阶段,分析了不同阶段影响过电压水平的主要因素,指出短路比与过电压水平密切相关;文献[41]也认为短路比对暂态过电压的影响较大,短路比越小,则系统对无功变化越敏感,暂态过电压问题越严重。

另外,风电集群的故障穿越能力不足也是导致暂态过电压的主要原因。由于风电汇集线路一般距离换流站较近,换流母线的暂态过电压易传递至近区风电场。如果风电场并网点电压高于1.3 p.u.,风电机组将会无延迟脱网,风机脱网后,近区线路的无功过剩,电压会进一步上升,引发更多的风电机组相继脱网,进一步促进换流站母线电压升高^[4]。文献[3]详细分析了直流闭锁和换相失败故障引发风电机组高压脱网的机制,考虑了风电并网容量与直流输送容量之间的相互制约关系及火电机组的电压支撑作用。除风电并网容量外,系统无功控制模式、发电机容量裕度以及调峰方式等因素也会影响系统暂

态过电压水平。

目前,对暂态过电压产生根源的分析已较为深入,但仍普遍视风电集群为被动受扰对象。事实上,送端接入大规模风电系统的暂态过电压特性应是直流环节暂态特性和风电集群高/低电压穿越特性交互作用的结果,合理计及风电集群的高/低电压穿越特性及其与系统之间的交互作用,有助于进一步完善对直流系统暂态过电压问题的认知。

2.2 暂态过电压的量化分析方法

通过对暂态过电压产生根源的解析可知,暂态期间的无功过剩水平、系统短路容量和风电集群的故障穿越能力是暂态过电压水平的主要影响因素。如何评估各因素对暂态过电压的影响方式与影响程度,需要建立暂态过电压与各影响因素间的量化关系,进而为系统的运行控制和保护策略制定提供理论依据。现有暂态过电压的量化分析方法主要包括估算法^[42]、交流等值法^[43-44]、无功短路比法^[45]和单支路压降法^[36]等,具体如表3所示。

表3 暂态过电压的量化分析方法对比

Table 3 Comparison of quantitative analysis methods of transient overvoltage

量化分析方法	计算公式	优点	缺点
估算法	式(1)	简单直观	精度低
交流等值法	式(2)	考虑了稳态传输功率和无功容量的动态变化	短路比较低的系统无实解
无功短路比法	式(3)	短路比较低的系统仍有实解	只分析了直流闭锁情况
单支路压降法	式(4)	同时考虑了有功、无功变化引起的电压变化	需先获得稳态潮流

估算法^[42]是将暂态压升 ΔU 表示为暂态期间的无功盈余水平 ΔQ 与系统短路容量 S 之比,如式(1)所示。该方法中的系统短路容量是静态指标,而无功盈余水平通常取为直流系统的无功消耗值,因此计算误差通常较大,适用于对精度要求不高的分析场合。

$$\Delta U = \Delta Q / S \quad (1)$$

对于图2所示的送端系统等值电路,交流等值法、无功短路比法、单支路压降法的计算公式分别如式(2)~(4)所示。

$$U = \frac{U_N^2 E - U_N E \sqrt{U_N^2 - 4Q_c X}}{2Q_c X} \quad (2)$$

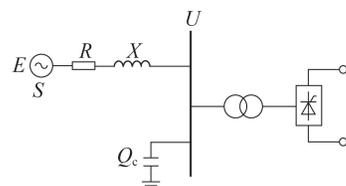


图2 送端系统等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of sending-end system

$$U = \frac{S + Q_c}{S - Q_c} \quad (3)$$

$$\Delta U = \frac{(P_0/S^2 - R)\Delta P + (Q_0/S^2 - X)\Delta Q}{U_N} \quad (4)$$

式中： U 为换流母线电压； U_N 为换流母线的额定电压； E 为送端交流等值电势； Q_c 为无功补偿容量； X 、 R 分别为等值电抗、电阻； ΔP 和 ΔQ 分别为故障发生前、后送端交流系统的有功变化量和无功变化量； P_0 、 Q_0 分别为稳态时送端有功功率、无功功率初值。

关于交流等值法，文献[43]根据系统稳态传输功率对交流系统进行等值，并考虑了暂态过程中静态无功补偿器补偿容量随电压升高的特性，但将其应用于短路比较低的系统时，可能会出现没有实解的情况；文献[44]在此基础上考虑了换流器的无功暂态变化特性，通过拟合方法获得了发生故障时换流器的最小无功消耗，对于无功过剩水平的表征更为精确。关于无功短路比法，文献[45]基于直流闭锁时换流母线的暂态过电压是谐振过电压的思路，推导了暂态过电压与谐振频率之间的关系式，提出了可用于低短路比系统的分析方法。关于单支路降压法，文献[36]以单支路电压降公式为基础，进一步考虑了系统有功功率变化对暂态过电压的贡献，提升了精度。

上述方法的主要贡献在于提供了发生故障后暂态过电压峰值的估算方法，但没有深入解析故障演化全过程的系统暂态电压特性，仅将送端系统等值为恒定电势串联阻抗的形式，显然无法有效计及风电集群的故障穿越特性。针对该问题，文献[45]简要分析了过电压引发送端系统接入新能源连锁脱网的情况，将新能源机组脱网的影响等效为送端系统短路容量减小；文献[36]进一步考虑了送端风电机组受影响进入低电压穿越的情况，增加了风电机组侧的固定无功盈余。然而，暂态期间大规模风电集群的功率响应是随着并网点电压动态变化的，是高/低电压穿越交替演化引起的复杂作用效果。因此，目前的研究对于风电集群动态特性在特高压直流送出系统暂态过电压过程的影响机理尚不明确，需要采用更为精细的量化评估方法进行表征。

2.3 暂态过电压分析研究展望

目前，在暂态过电压根源解析和过电压量化分析方法方面，已有研究大多着眼于直流闭锁故障场景，对于连续换相失败、连续换相失败后直流闭锁和直流再启动等其他类型故障的演化机理解析尚不深入，也没有充分考虑风电集群动态特性和故障期间多设备交互作用对暂态过电压的影响，这也正是暂态过电压问题分析亟待突破的难点。此外，暂态过

电压影响整个直流送端近区，不能仅研究送端换流母线的电压特性。建议分析在不同故障场景、运行条件和控制策略下，不同类型电网设备在不同时间尺度下的无功动态行为，基于多样化设备在故障穿越全过程中的无功-电压响应特性，分析多样化设备的无功行为对系统关键节点电压的影响规律，挖掘各关键节点电压的峰值特征和主导影响因素，从而揭示各关键节点电压在不同故障阶段的演化机理。

3 暂态过电压抑制策略设计

明确暂态过电压的产生根源和影响因素后，可以有针对性地设计暂态过电压抑制策略。在系统规划层面，可通过增大短路比^[40]、优化系统暂态无功特性^[46]等方式，改善系统暂态过电压水平。此外，柔性直流输电系统具备有功和无功功率解耦控制、不存在换相失败、可接入无源网络等优点，采用柔性直流输电方式实现风电等可再生能源外送也已被业界关注与认同。

在控制策略层面，可通过系统级保护控制优化^[5,14]、直流控制优化^[47-50]、风电集群控制优化^[51-54]以及无功补偿控制优化^[55-59] 4种方法抑制系统的暂态过电压，具体如下表4所示。

表4 暂态过电压抑制方法对比

Table 4 Comparison of transient overvoltage suppression methods

方法	优点	缺点
系统级保护控制优化	增强稳定性，防止暂态过电压加剧引起故障扩散	存在动作延时，主要用于直流闭锁场景
直流控制优化	直接减少注入交流系统的无功盈余水平	需要重新整定与优化后策略相匹配的保护环节参数
风电集群控制优化	可获得一定的无功支撑能力，无需附加改造	受运行条件约束，无功支撑能力有限，只能作为辅助
无功补偿控制优化	提供无功支撑，提高等效无功容量，功能多样	需要额外成本，控制不当可能产生“反调”问题

3.1 系统级保护控制优化

文献[14]根据实际案例分析结果指出，极控切换滤波器和安控切机动作时序配合不当可能引起暂态电压2次升高，为此提出了一种优化协调控制方法；文献[5]对触发直流闭锁的紧急停机策略进行了改进，通过减缓直流闭锁的触发过程，改变保护措施的触发顺序，与安控系统相互配合来抑制暂态过电压。

由于设备动作存在延时，系统级保护控制优化方法主要用于应对故障后数百毫秒到数秒间的过电压问题，以防止过电压问题加剧导致故障扩散，而造成风机连锁脱网事故的发生。在优化系统级保护控制策略时，需要综合考虑各设备间的协同配合以及发生故障后系统整体的功角、频率和电压稳定特性。

3.2 直流控制优化

故障期间直流线路的有功传输受阻,无功消耗大幅降低是导致送端出现无功过剩的直接原因,因此直流控制策略的优化方法主要围绕改善故障期间直流系统的无功特性进行。文献[42]研究了整流侧电流控制器和低压限流控制器参数影响暂态过电压的机理;文献[47]通过优化直流低压限流环节、换相失败预测、电流控制器等重要控制参数来减小换相失败过程中直流与送受端系统交换的最大无功功率,进而抑制暂态过电压;文献[48]以暂态过程中无功平衡作为控制条件,通过改变整流站的电流指令值来实现换相失败过程中无功功率的平衡控制,降低送端系统交流电压波动;文献[49]通过增加逆变侧关断角,短时提升健全极消耗的无功功率,抑制送端弱交流电网过电压的产生;文献[50]提出了一种恒定无功控制策略,可以增加整流器消耗的无功功率,减少直流与系统之间的无功功率交换以降低送端过电压。

对直流控制策略进行优化可以从源头上减少注入系统的无功功率进而降低暂态过电压幅度,但在进行优化时要以不改变直流运行和调节性能为前提,同时保持其与系统其他控制环节相匹配。

3.3 风电集群控制优化

风电集群具备一定的无功调节能力,可以在保证故障期间并网运行的基础上,通过优化暂态期间的控制策略,使风电集群从系统吸收动态无功以缓解送端无功过剩。文献[51-52]分析了由换相失败引发的电压扰动下双馈风机的故障穿越响应特性,结果表明相比于单一低电压、高电压扰动场景,双馈风机在连续电压扰动场景下的脱网风险显著提高;文献[32]根据双馈风机的功率可控运行区域,结合健全极的短时过载能力,在故障期间通过控制风电场吸收部分无功实现对过电压的抑制;文献[11]讨论了电网电压骤升时双馈风机的功率约束原则和可控区,提出了风电机组参与暂态无功调节的优化控制策略;文献[53]提出了一种基于 $P-Q$ 协调的风机控制策略,通过与快速有功功率控制相配合,提升了暂态过程中的无功功率容量,从而抑制过电压;文献[54]认为风机控制器中电网电压检测环节的延时是暂态过电压的重要影响因素,提出了一种延时补偿策略来抑制暂态过电压。

对风电集群控制策略进行优化的前提是暂态期间风电机组仍运行在可控区域内,这就要求风电机组具备一定的高电压穿越能力。暂态期间风电机组受过电压程度、机组运行工况等因素的影响,能够向系统提供的动态无功容量较为有限,因此通常作为一种辅助优化手段与其他措施共同作用。

3.4 动态无功补偿控制优化

动态无功补偿装置通过快速响应系统的无功变化为系统提供无功支撑,是抑制暂态过电压问题的有效措施^[55]。文献[56-57]分析结果表明,通过静止同步补偿器 STATCOM (STATic synchronous COMPensator) 调节无功输出可以提高暂态期间交流系统的强度,抑制故障过程中送端暂态过电压,加快系统的故障恢复速度;文献[35]研究了调相机的次暂态特性、暂态特性及稳态特性对直流送受端电网的影响,表明大容量同步调相机能够增加系统的短路比,改善暂态过程特性;文献[34]对比了同步调相机、SVC和SVG在交直流系统中的动态无功支撑能力与暂态电压调节能力,指出相同容量下同步调相机对送端电压的支撑效果最好;文献[58]通过一种暂态过电压评估指标量化分析了不同类型无功补偿设备对暂态过电压的抑制能力,也得出了同步调相机调节能力最优的结论;文献[59]基于暂态过电压的短路比增量指标,定量评估了同步调相机对暂态过电压的作用效果;文献[16]提出了一种根据暂态过电压的大小确定调相机加装容量的选取原则。

动态无功补偿设备抑制暂态过电压的作用明显,还兼具调节稳态无功、改善电能质量等功能。但对于大容量送出系统而言,加装成本高昂,且需要注意避免控制不当出现“反调”现象^[34]。

3.5 暂态过电压抑制策略设计研究展望

现有关于暂态过电压抑制策略方面的研究大多基于单一设备和目标进行策略设计,通常停留在时域仿真和定性分析层面。暂态过电压抑制策略制定的难点在于:要能够从全局角度出发,设计系统化、实用化的多设备协同控制策略。建议从不同时间尺度、不同控制层级解析各设备间动态无功的交互作用,研究多样化设备无功支撑行为对暂态过电压的影响途径和机理,分别梳理对系统稳定有益以及有反作用的控制策略,提炼关键可控环节和参数,研究其多样化约束,量化评估各设备的无功动态支撑能力。进一步考虑不同时间尺度的协调、不同设备间的协调以及无功支撑能力的协调,统筹兼顾系统各环节的控制优势和特性,扬长避短,综合考量不同抑制策略的实现成本与优化效果,制定风电经特高压直流送出系统的暂态过电压多维协同抑制策略。

4 结论

针对大规模风电经特高压直流送出系统的暂态过电压问题,本文从系统仿真建模、暂态过电压根源解析、抑制策略设计3个方面进行了综述与分析,得到现存的挑战及可行的解决方案如下:

1)在系统建模方面,现有建模方法尤其是风电集群的等值建模方法过于理想化,建议根据不同类

型电网设备在故障穿越全过程中的动态响应特性,结合过电压问题分析对模型的精细化程度需求,建立能够兼顾精度和计算量的系统电磁暂态模型;

2)在暂态过电压根源解析方面,对不同故障场景的分析尚不够全面,也缺乏对风电集群高/低电压穿越特性的考虑,建议分析时应充分考虑不同类型故障场景下系统各环节尤其是风电集群的无功-电压响应特性的时序过程及其对暂态过电压的影响;

3)在暂态过电压抑制策略方面,现有策略仅针对单一设备或目标进行设计,建议统筹兼顾系统各环节的控制优势和特性,研究其多样化约束和多维协同关系,扬长避短,制定系统化、实用化的风电经特高压直流送出系统的暂态过电压多维协同抑制策略。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘振亚,张启平,董存,等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2513-2522.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [2] 马进,赵大伟,钱敏慧,等. 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述[J]. 电网技术,2017,41(10):3112-3120.
MA Jin, ZHAO Dawei, QIAN Minhui, et al. Reviews of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized sending-end DC power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3112-3120.
- [3] 屠竞哲,张健,刘明松,等. 风火打捆直流外送系统直流故障引发风机脱网的问题研究[J]. 电网技术,2015,39(12):3333-3338.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, LIU Mingsong, et al. Study on wind turbine generators tripping caused by HVDC contingencies of wind-thermal-bundled HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3333-3338.
- [4] 贺静波,庄伟,许涛,等. 暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J]. 电网技术,2016,40(6):1839-1844.
HE Jingbo, ZHUANG Wei, XU Tao, et al. Study on cascading tripping risk of wind turbines caused by transient overvoltage and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1839-1844.
- [5] 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 transient overvoltage caused by DC block on wind power transmission and its suppression measure[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 99-105.
- [6] 屠竞哲,潘艳,瞿鹏,等. 功角失稳与暂态过电压并存型锡盟交直流弱送端系统特性分析[J]. 电网技术,2021,45(4):1496-1506.
TU Jingzhe, PAN Yan, ZI Peng, et al. Ximeng AC/DC weak sending-side system characteristics with angle instability and transient overvoltage[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1496-1506.
- [7] 于强,孙华东,仲悟之,等. 扎鲁特—青州特高压直流输电工程投运后东北电网的稳定特性及控制措施研究[J]. 电网技术,2018,42(7):2023-2029.
YU Qiang, SUN Huadong, ZHONG Wuzhi, et al. Stability characteristics and control measures of northeast power grid integrated with Zhalute-Qingzhou UHVDC transmission project [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2023-2029.
- [8] 赵晋泉,朱尧靓,潘尔生,等. 适用于大规模新能源接入直流送端电网的暂态电压严重性指标研究[J]. 南方电网技术,2020,14(12):1-9.
ZHAO Jinquan, ZHU Yaoliang, PAN Ersheng, et al. Study on transient voltage rise severity index for the high renewable power-penetrated UHVDC sending-end power grid[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 1-9.
- [9] 李欣悦,李凤婷,尹纯亚,等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(1):1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [10] 杨楠,崔伟,王智伟,等. 含风电特高压直流系统单极接地故障暂态特性研究[J]. 高压电器,2020,56(2):142-149,157.
YANG Nan, CUI Wei, WANG Zhiwei, et al. Research on transient characteristics of monopolar grounding fault for wind power integrated UHVDC [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 142-149, 157.
- [11] 韩平平,张海天,丁明,等. 大规模高压直流输电系统闭锁故障下送端风电场高电压穿越的控制策略[J]. 电网技术,2018,42(4):1086-1095.
HAN Pingping, ZHANG Haitian, DING Ming, et al. A coordinated HVRT strategy of large-scale wind power transmitted with HVDC system[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1086-1095.
- [12] 骆悦,姚骏,张田,等. 大规模风电直流外送系统单极闭锁场景下送端系统协调控制策略[J]. 电工技术学报,2019,34(19):4108-4118.
LUO Yue, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Coordinated control strategy of large-scale wind power generation sending system under mono-polar block fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4108-4118.
- [13] 丁明,张炎,韩平平,等. 大规模风火电送端系统直流闭锁紧急控制策略研究[J]. 太阳能学报,2019,40(7):1928-1937.
DING Ming, ZHANG Yan, HAN Pingping, et al. Research of urgent control strategy under HVDC block for wind-thermal-bundled sending end system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(7): 1928-1937.
- [14] 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 overvoltage [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2526-2531.
- [15] 周长春,徐政. 直流输电准稳态模型有效性的仿真实验[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):33-36.
ZHOU Changchun, XU Zheng. Simulation validity test of the HVDC quasi-steady-state model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 33-36.
- [16] 赵学明,李永丽,孙广宇,等. 换相失败对含风电场的交直流

- 混联系统送端过电压的影响[J]. 高电压技术,2019,45(11):3666-3673.
- ZHAO Xueming,LI Yongli,SUN Guangyu,et al. Effect of commutation failure on the overvoltage on rectifier station in AC/DC hybrid power system with wind farms[J]. High Voltage Engineering,2019,45(11):3666-3673.
- [17] 刘博,郭春义,赵成勇. 直流斩波器对抑制换相失败引发的弱送端电网暂态过电压的研究[J]. 电网技术,2019,43(10):3578-3586.
- LIU Bo, GUO Chunyi, ZHAO Chengyong. Research on DC chopper in suppressing transient overvoltage of weak sending terminal caused by commutation failure[J]. Power System Technology,2019,43(10):3578-3586.
- [18] QIAN M H, ZHAO D W, MA J, et al. Operation characteristics of DC transmission system with large-scale renewable energy integration[J]. The Journal of Engineering,2019,2019(16):1703-1708.
- [19] 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.
- [20] 别睿,邱慧敏,吴博,等. 溪洛渡右岸送电广东双回直流孤岛运行时昭通换流站侧过电压水平研究[J]. 高压电器,2015,51(10):54-62.
- BIE Rui, QIU Huimin, WU Bo, et al. Overvoltage level research in Zhaotong converter station with Xiluodu right side HVDC project in islanded operation mode[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(10):54-62.
- [21] 陈锡磊,周浩,王东举,等. ± 800 kV浙西特高压直流换流站暂态过电压研究[J]. 电网技术,2012,36(3):22-27.
- CHEN Xilei,ZHOU Hao,WANG Dongju,et al. Study on transient overvoltage of Zhexi converter station of ± 800 kV DC power transmission project[J]. Power System Technology,2012,36(3):22-27.
- [22] 万磊,汤涌,吴文传,等. 特高压直流控制系统机电暂态等效建模与参数实测方法[J]. 电网技术,2017,41(3):708-714.
- WAN Lei,TANG Yong,WU Wenchuan,et al. Equivalent modeling and real parameter measurement methods of control systems of UHVDC transmission systems[J]. Power System Technology,2017,41(3):708-714.
- [23] 曾雪洋,刘天琪,王顺亮,等. 换相失败下柔性直流与传统直流互联输电系统的暂态无功协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):28-35.
- ZENG Xueyang,LIU Tianqi,WANG Shunliang,et al. Coordinated transient reactive power control strategy for transmission system connected by VSC-HVDC and LCC-HVDC under commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):28-35.
- [24] 朱艺颖,董鹏,胡涛,等. 大规模“风火打捆”经直流外送数模混合仿真系统[J]. 电网技术,2013,37(5):1329-1334.
- ZHU Yiyang,DONG Peng,HU Tao,et al. A digital-analog hybrid simulation system for sending out massive thermal-generated power bundled with wind power via HVDC transmission system[J]. Power System Technology,2013,37(5):1329-1334.
- [25] 杨尉薇,朱玲,李威,等. 风火打捆直流送出系统次同步振荡及传播特性研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(20):58-64.
- YANG Weiwei,ZHU Ling,LI Wei,et al. Study on subsynchronous oscillation and propagation characteristics of wind-fire bundled sending system[J]. Power System Protection and Control,2019,47(20):58-64.
- [26] 高本锋,刘毅,宋瑞华,等. 双馈风电场经LCC-HVDC送出的次同步振荡特性研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(11):3477-3489.
- GAO Benfeng,LIU Yi,SONG Ruihua,et al. Study on subsynchronous oscillation characteristics of DFIG-based wind farm integrated with LCC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(11):3477-3489.
- [27] 张新燕,孟瑞龙,梅生伟,等. 含大规模风电送端系统对直流系统的影响[J]. 高电压技术,2015,41(3):730-738.
- ZHANG Xinyan,MENG Ruilong,MEI Shengwei,et al. Impact on HVDC systems by the sending AC system with large-scale wind farms[J]. High Voltage Engineering,2015,41(3):730-738.
- [28] 丁茂生,王辉,舒兵成,等. 含风电场的多直流送出电网电磁暂态仿真建模[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(23):63-70.
- DING Maosheng,WANG Hui,SHU Bingcheng,et al. Electromagnetic transient simulation model of multi-send HVDC system with wind plants[J]. Power System Protection and Control,2015,43(23):63-70.
- [29] 郭小江,马世英,申洪,等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(15):107-115.
- GUO Xiaojiang,MA Shiyang,SHEN Hong,et al. HVDC grid connection schemes and system stability control strategies for large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(15):107-115.
- [30] 江琴,刘天琪,曾雪洋,等. 大规模风电与直流综合作用对送端系统暂态稳定影响机理[J]. 电网技术,2018,42(7):2038-2046.
- JIANG Qin,LIU Tianqi,ZENG Xueyang,et al. Influence mechanism of comprehensive action of large-scale wind power and HVDC transmission system on sending system transient stability[J]. Power System Technology,2018,42(7):2038-2046.
- [31] 尹纯亚,李凤婷,王丹东,等. 风电高渗透率交直流外送系统直流闭锁稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(3):95-102.
- YIN Chunya,LI Fengting,WANG Dandong,et al. Research on stability control scheme for AC/DC hybrid transmission system with wind power high permeability under DC blocking[J]. Power System Protection and Control,2019,47(3):95-102.
- [32] ZHANG T,YAO J,PEI J X,et al. Coordinated control of HVDC sending system with large-scale DFIG-based wind farm under mono-polar blocking fault[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2020,119:105943.
- [33] YOGARATHINAM A,KAUR J,CHAUDHURI N R. Impact of inertia and effective short circuit ratio on control of frequency in weak grids interfacing LCC-HVDC and DFIG-based wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2017,32(4):2040-2051.
- [34] 金一丁,于钊,李明节,等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术,2018,42(7):2095-2102.
- JIN Yiding,YU Zhao,LI Mingjie,et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology,2018,42(7):2095-2102.
- [35] 王雅婷,张一弛,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):22-28.
- WANG Yating,ZHANG Yichi,ZHOU Qinyong,et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology,2017,41

- (1):22-28.
- [36] 曹生顺,张文朝,王蒙,等. 大容量直流发生功率大扰动时送端风机暂态过电压快速分析方法研究[J]. 高电压技术,2017,43(10):3300-3306.
CAO Shengshun,ZHANG Wenchao,WANG Meng, et al. Study on fast analysis method transient fundamental frequency over-voltage of wind turbine generators in sending system when serious power disturbances occur in large-capacity UHVDC[J]. High Voltage Engineering,2017,43(10):3300-3306.
- [37] 尹纯亚,李凤婷,陈伟伟,等. 单极闭锁引起直流健全极换相失败分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(11):114-119,132.
YIN Chunya,LI Fengting,CHEN Weiwei, et al. Commutation failure risk analysis of sound pole caused by DC monopole blocking[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(11):114-119,132.
- [38] LI F F,CHEN Q,LIN X, et al. Simulation on power characteristic of UHVDC during commutation failure and DC block [C]//2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Saskatoon,SK,Canada;IEEE,2017:1-6.
- [39] 贺静波,万磊,霍超,等. 高压直流输电非典型工况下过电压异常风险分析[J]. 电网技术,2014,38(12):3459-3463.
HE Jingbo,WAN Lei,HUO Chao, et al. Abnormal over-voltage risk analysis of HVDC transmission on a typical conditions[J]. Power System Technology,2014,38(12):3459-3463.
- [40] 陈亦平,陈磊,叶骏,等. 发电机高压侧电压控制在抑制云广直流孤岛过电压中的作用[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):121-126.
CHEN Yiping,CHEN Lei,YE Jun, et al. Effect of generator high-voltage-side voltage control on mitigating overvoltage in islanded Yunnan-Guangdong UHVDC sending system[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(20):121-126.
- [41] LIU X J,YANG H G,ZHOU Y F. Impact of short-circuit ratio change to HVDC operating characteristics[C]//2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China:IEEE,2011:1-4.
- [42] 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.
- [43] 王峰,刘天琪,丁媛媛,等. 直流闭锁引起的暂态过电压计算方法及其影响因素分析[J]. 电网技术,2016,40(10):3059-3065.
WANG Feng,LIU Tianqi,DING Yuanyuan, et al. Calculation method and influencing factors of transient overvoltage caused by HVDC block[J]. Power System Technology,2016,40(10):3059-3065.
- [44] 孙家豪,王笑雪,李光辉,等. 换相失败引起送端电网过电压的定量计算及影响因素[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(12):62-68.
SUN Jiahao,WANG Xiaoxue,LI Guanghui, et al. Quantitative calculation and influencing factors of overvoltage of sending-side system caused by commutation failure[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2020,32(12):62-68.
- [45] 尹纯亚,李凤婷,周识远,等. 基于无功功率短路比的直流闭锁暂态过电压计算方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(10):150-154,161.
YIN Chunya,LI Fengting,ZHOU Shiyuan, et al. Calculation method of transient overvoltage due to DC blocking based on short circuit ratio of reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(10):150-154,161.
- [46] 郑超,汤涌,马世英,等. 网源稳态调压对暂态无功支撑能力的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):115-122.
ZHENG Chao,TANG Yong,MA Shiyong, et al. Study on the influence of steady-state voltage regulation schemes on transient reactive power supporting capability[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):115-122.
- [47] 屠竞哲,张健,曾兵,等. 直流换相失败及恢复过程暂态无功特性及控制参数影响[J]. 高电压技术,2017,43(7):2131-2139.
TU Jingzhe,ZHANG Jian,ZENG Bing, et al. HVDC transient reactive power characteristics and impact of control system parameters during commutation failure and recovery[J]. High Voltage Engineering,2017,43(7):2131-2139.
- [48] 刘琳,雷霄,孔祥平,等. 抑制换相失败期间送端电网过电压的控制策略研究[J]. 电力工程技术,2019,38(3):60-66.
LIU Lin,LEI Xiao,KONG Xiangping, et al. The control strategy for suppressing overvoltage of sending grid during commutation failure[J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(3):60-66.
- [49] 叶有名,朱清代,滕予非,等. 基于特高压直流输电无功调制的直流近区交流过电压优化控制策略[J]. 现代电力,2018,35(6):25-32.
YE Youming,ZHU Qingdai,TENG Yufei, et al. The optimized control strategy for AC overvoltage of the near region grid of DC transmission system based on reactive power control in UHVDC systems[J]. Modern Electric Power,2018,35(6):25-32.
- [50] YIN C Y,LI F T. Reactive power control strategy for inhibiting transient overvoltage caused by commutation failure [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2021,36(5):4764-4777.
- [51] ZHENG Z X,REN J,XIAO X Y, et al. Response mechanism of DFIG to transient voltage disturbance under commutation failure of LCC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2020,35(6):2972-2979.
- [52] ZHANG T,YAO J,SUN P, et al. Improved continuous fault ride through control strategy of DFIG-based wind turbine during commutation failure in the LCC-HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2021,36(1):459-473.
- [53] ZHOU C P,WANG Z,JU P, et al. High-voltage ride through strategy for DFIG considering converter blocking of HVDC system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2020,8(3):491-498.
- [54] JIN X,NIAN H. Overvoltage suppression strategy for sending AC grid with high penetration of wind power in the LCC-HVDC system under commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2021,36(9):10265-10277.
- [55] 索之闻,刘建琴,蒋维勇,等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):124-129.
SUO Zhiwen,LIU Jianqin,JIANG Weiyong, et al. Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):124-129.
- [56] 林安妮,黄永章,林伟芳,等. 不同动态无功补偿装置对直流系统故障引发送端暂态过电压的抑制效果对比[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(4):116-122.
LIN Anni,HUANG Yongzhang,LIN Weifang, et al. Comparison of suppression effect of different dynamic reactive power compensation devices for transient overvoltage caused by HVDC system faults[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensa-

tion, 2020, 41(4):116-122.

- [57] ZHANG Y, GOLE A M. Comparison of the transient performance of STATCOM and Synchronous condenser at HVDC converter stations [C] // 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, UK: IET, 2015: 1-8.
- [58] XUE A C, YUE L, ZHANG J H, et al. A new quantitative analysis method for overvoltage in sending end electric power system with UHVDC [J]. IEEE Access, 2020, 8: 145898-145908.
- [59] 乔丽, 王航, 谢剑, 等. 同步调相机对分层接入特高压直流输电系统的暂态过电压抑制作用研究 [J]. 中国电力, 2020, 53(3): 43-51.
- QIAO Li, WANG Hang, XIE Jian, et al. Suppressing effect of synchronous condenser on transient overvoltage of UHVDC system under hierarchical connection mode [J]. Electric Power, 2020, 53(3): 43-51.

作者简介:



李帛洋

李帛洋(1992—),男,吉林永吉人,博士研究生,研究方向为直流输电与新能源系统建模等(E-mail:liboyang_hit@163.com);

晁璞璞(1990—),女,山东菏泽人,讲师,博士,主要研究方向为新能源建模与并网控制等(E-mail:pupuc@163.com);

徐式蕴(1985—),女,河北秦皇岛人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制等(E-mail:xushiyun@epi.

sgcc.com.cn);

李卫星(1977—),男,河南正阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源建模、电力系统分析与控制等(E-mail:wqli@hit.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Review on transient overvoltage issues of wind power transmission system via UHVDC

LI Boyang¹, CHAO Pupu¹, XU Shiyun², LI Weixing¹, LIU Xinyuan³, LI Zhimin¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: When large-scale wind power is transmitted through UHVDC (Ultra-High Voltage Direct Current) lines, transient overvoltage issues caused by commutation failure, DC blocking, and so on, seriously affect the system safe and stable operation and restrict system transmission capacity. The research steps and key technical challenges of transient overvoltage issues of wind power transmission system via UHVDC are summarized and reviewed respectively from three aspects of system simulation and modeling, cause analysis of transient overvoltage and design of suppression strategies. Based on the simulation and modeling of large-scale wind power transmission system via UHVDC, the modeling methods and their advantages and disadvantages are reviewed. The evolution process of two types of typical transient overvoltage is described, and the causes, influencing factors and quantitative analysis methods are analyzed. According to the implementation object of control strategies, the advantages and disadvantages of various control methods are compared and analyzed from the aspects of system-level protection control, DC system control, wind power cluster control and reactive power compensation control. In view of the above three aspects, the existing results are summarized and the research trends are prospected, in order to provide the basis for fault ride-through control of large-scale wind power transmission system via UHVDC.

Key words: large-scale wind power; UHVDC; transient overvoltage; control strategies

附录 A

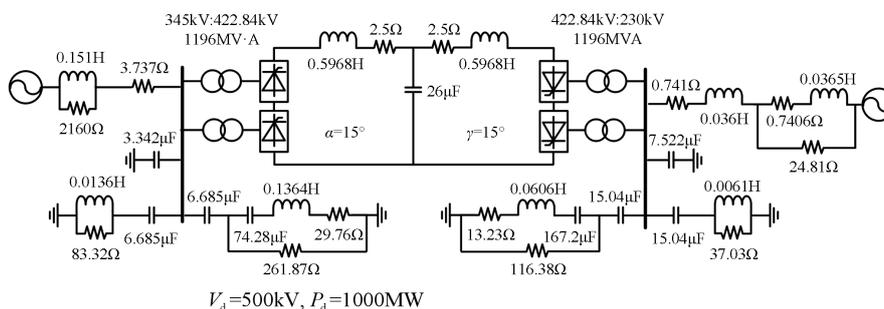


图 A1 CIGRE HVDC 标准测试系统示意图

Fig.A1 Schematic diagram of CIGRE HVDC benchmark system

图中， α 为额定触发角； γ 为额定熄弧角； V_d 为额定直流电压； P_d 为额定直流功率。

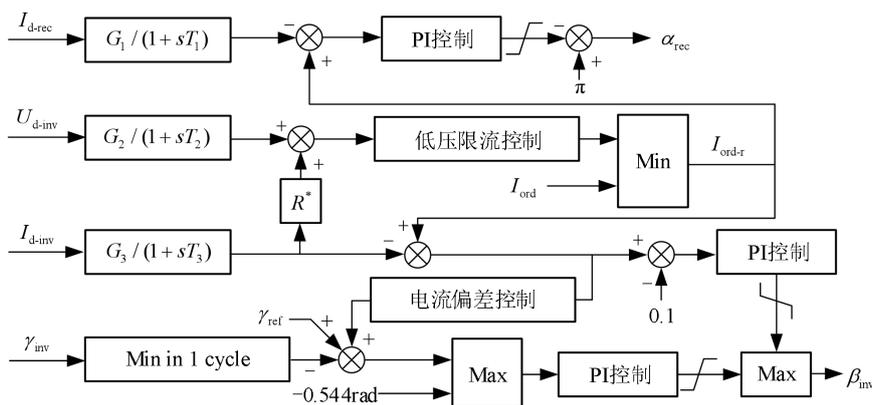


图 A2 特高压直流系统的简化控制结构

Fig.A2 Simplified control structure of UHVDC system

图中， I_{d-rec} 为整流侧直流电流测量值； U_{d-inv} 为逆变侧直流电压测量值； I_{d-inv} 为逆变侧直流电流测量值； R^* 为补偿电阻； I_{ord} 为主控制级给出的直流电流指令值； I_{ord-r} 为整流侧的直流电流指令值； α_{rec} 为整流侧触发角指令值； β_{inv} 为逆变侧超前触发角指令值； γ_{inv} 为逆变侧熄弧角测量值； γ_{ref} 为逆变侧熄弧角额定值。