

大规模新能源直流外送系统调相机配置研究

索之闻¹, 刘建琴¹, 蒋维勇¹, 李志强², 杨林¹

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:针对抑制送端电网暂态过电压的技术需求,首先分析了送端电网暂态过电压的影响因素;然后构建了直流外送试验仿真系统,基于机电暂态仿真,考虑分布式调相机及其分层分散配置的作用,分别提出了调相机集中和分散接入不同电压等级配置方案;最后通过对比各方案给出了大规模新能源直流外送系统调相机配置建议,研究表明在各新能源汇集站低电压等级侧分散配置小型化调相机,不仅可以全面解决送端系统的暂态过电压问题,还能进一步提高经济性。

关键词:电力系统;新能源直流外送系统;安全稳定;暂态分析;暂态过电压;分布式调相机;分层分散配置

中图分类号:TM 721.1;TM 342

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909054

0 引言

目前,我国风电、光伏仍处于高速发展时期,并网装机容量均位居世界第一。我国的资源禀赋决定了能源建设必须走开发大基地、依托大电网、融入大市场的发展道路^[1-2]。

高压直流输电技术能够大幅提高电网远距离、大规模输电能力,使我国西、北部清洁能源的集约高效开发和大范围配置消纳成为可能,对保障能源安全、推动东西部地区协调发展具有重要意义^[3-4]。

采用特高压直流输送新能源,由于送端电网相对薄弱,当发生直流系统线路故障、受端换相失败、直流闭锁等故障时,特高压直流在暂态过程中的无功大范围波动导致送端电网电压剧烈变化,这将对新能源运行产生影响,可能造成新能源的无序脱网(以风电为例,国家标准规定当风电场并网点电压为标准电压的90%~110%时,风电机组应能正常运行;当风电场并网点电压超过标准电压的110%时,风电场的运行状态由风电机组的性能确定),进一步导致直流输送新能源能力受限,严重情况下还会引起电网的稳定问题^[5-6]。

动态无功补偿对于保障电网电压稳定和特高压直流安全运行至关重要,新一代调相机在系统故障瞬间电压支撑能力强、暂态响应速度快、过载能力大,且具备较大容量的进相能力,相比于静止无功补偿器SVC(Static Var Compensator)、静止无功发生器SVG(Static Var Generator)等电力电子动态无功补偿设备,调相机作为同步旋转设备对直流引起的

系统暂态电压波动具有更好的抑制效果^[7-10]。根据规划,国家电网有限公司将在多回特高压直流工程送端系统加装调相机,如已投运的扎青、酒湖等直流工程^[11]。

现有关于动态无功补偿配置的研究,主要考虑以低电压为特征的静态、暂态电压稳定性,研究对象主要为SVC和SVG^[12-19]。文献[12]基于向量场正规形理论,提出了一种确定SVC安装位置的新方法;文献[13]计及多馈入直流间的相互影响,研究了提高直流换相失败后恢复的SVC布点方法;文献[14]针对多直流馈入电网电压稳定特性及与无功补偿的关系,提出了一种基于电压灵敏度的动态无功补偿实用选点方法。对于含大规模新能源的送端系统,目前调相机原则上均配置在换流站高压侧(调相机单台容量为300 Mvar),用以抑制直流典型故障下换流站暂态过电压。然而,由于新能源通常采用逐级升压的汇集方式,距离换流站的电气距离较远,大容量调相机集中装设在换流站无法有效缓解新能源对于送端系统暂态过电压的助增作用,现有研究未考虑分布式调相机及其分层分散配置的作用。

本文首先分析了大规模新能源直流外送系统暂态过电压的影响因素,然后构建了直流外送试验仿真系统,基于时域仿真计算,分别提出了高、低电压等级调相机配置方案,最后通过对比给出了送端系统调相机的配置建议。

1 送端系统暂态过电压影响因素

直流系统常见的故障类型:如直流重启动、直流闭锁、换相失败等,均会导致送端系统暂态过电压。由于换相失败故障发生的概率较高,且通常是双极同时发生,因此换相失败故障是本文关注的重点。

1.1 直流控制环节

直流换相失败故障发生后,送端交流系统电压

收稿日期:2018-11-19;修回日期:2019-08-15

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5102-201956301A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5102-201956301A-0-0-00)

先降后升,文献[20]对影响直流控制系统特性的主要控制环节进行了灵敏度分析,包括换相失败预测控制环节、电流控制 CCA (Current Control Amplifier) 环节、低压限流 VDCOL (Voltage Dependent Current Order Limit) 环节以及正斜率控制环节,指出 CCA 环节的比例系统、积分时间常数以及 VDCOL 环节的最小限制电流、直流电压下降时间常数对送端交流系统的暂态过电压特性影响较大,是控制系统优化的关键参数。例如,VDCOL 环节中的最小限制电流将影响送端系统暂态过电压的持续时间,而直流电压下降时间常数将影响暂态过电压的幅值。然而,在大规模新能源直流外送场景下,仅通过优化直流控制参数并不能有效抑制新能源系统对于送端电网暂态过电压的助增作用。

1.2 无功补偿类型

1.2.1 SVC

SVC 拓扑和控制结构如附录中图 A1 所示,其通过晶闸管控制电容 / 电抗器投退,实现无功功率的平滑调节。

直流换相失败后 SVC 的无功出力如附录中图 A2 所示,无功功率为正值表示吸收无功。可以看出,直流换相失败后送端交流系统电压先降后升,当系统电压降低时,SVC 滞相发出一定数量的无功功率;而当系统电压升高时,进相无功无法立即跟上,SVC 仍滞相输出无功功率,这反而助增了系统的过电压,呈现无功电压“反调”特性。

通过增加控制系统的响应速度和增益可以提高 SVC 的响应速度,但是控制系统响应速度和增益的提升可能导致 SVC 在弱系统下出现振荡,如附录中图 A3 所示,对系统安全稳定造成不利影响。

1.2.2 SVG

SVG 是一种快速动态无功补偿设备,其通过调节输出电压幅值和相位实现与交流系统无功功率的交换。SVG 无功功率、电压特性曲线如附录中图 A4 所示。虽然 SVG 比 SVC 有更快的响应速度,但由于其仍是通过控制环节响应电网电压的变化,当送端系统电压变化较快时(如连续换相失败故障),仍将可能呈现电压“反调”特性。

1.2.3 调相机

调相机可以在几十毫秒内将定转子储存电磁场能提供至电网,其无功功率与调相机主参数相关。机端电压突变时,次暂态过程中定子输出电流如下:

$$I_d'' = (E_q'' - U_i) / X_d'' \quad (1)$$

其中, E_q'' 为调相机 q 轴次暂态电动势,在故障发生时不能发生突变; U_i 为机端电压(电网电压); X_d'' 为 d 轴次暂态电抗; I_d'' 为次暂态过程中定子输出电流。

X_d'' 越小,调相机提供的次暂态无功功率越大,

越有利于系统暂态特性改善。但由于调相机动稳和热稳需求, X_d'' 不能过小。

在系统电压发生突变时,调相机可根据系统电压的情况快速发出或吸收无功功率,不呈现电压“反调”特性,较 SVC 和 SVG 无功电压性能更优。调相机无功功率、电压特性曲线如附录中图 A5 所示。图中, Q_{sc} 为调相机无功出力。

调相机接入可能导致系统短路电流超标,可采取线路出串或加装串抗等多种方式解决,而且主要针对受端地区。对于本文所提大规模新能源直流外送系统,其短路电流水平相对较低,加装调相机反而能够提高系统短路容量,有利于抑制送端系统的暂态过电压。不仅如此,调相机还能提供转动惯量,更有利于提高新能源直流外送系统的频率稳定水平。

1.3 新能源发电系统

1.3.1 无功功率控制策略

送端交流系统的暂态过电压水平和新能源发电系统并网逆变器的无功功率控制策略有关,以光伏为例:当采用定电压控制时,逆变器会根据系统电压的变化发出或吸收无功功率;当直流发生双极闭锁故障时,逆变器响应系统电压的变化迅速吸收无功功率,有效阻止系统电压升高;而当直流发生换相失败时,送端系统电压先降后升,和 1.2 节提到的 SVG “反调”特性类似,由于电压上升过程中光伏逆变器仍可能滞后输出无功功率,进而助增了光伏并网点的暂态过电压,最终导致系统电压的进一步升高。光伏无功功率、电压特性曲线如附录中图 A6 所示。

1.3.2 机组类型

送端交流系统的暂态过电压水平也和新能源发电单元类型有关,不同于光伏 / 直驱风机与系统完全解耦,双馈风机的定子与电网直接相连,转子通过三相背靠背换流器实现交流励磁。当系统电压突然变化时,由于风机定子磁链不能突变,会感应出直流分量,反应在并网点则会发出或吸收部分无功功率。双馈风机在系统过电压瞬间拥有类似“同步机”的特性。双馈风机无功功率、电压特性曲线如附录中图 A7 所示。

1.4 新能源汇集方式

送端交流系统的暂态过电压水平还和新能源汇集方式有关,搭建仿真算例,对于同一运行方式,在采用相同新能源机组类型和控制方式的情况下,附录中图 A8 为新能源分散和集中汇集时,直流发生换相失败故障后送端换流母线的电压曲线。可以看出,新能源分散汇集时的暂态过电压约为 1.345 p.u., 新能源集中汇集时的暂态过电压约为 1.397 p.u.。因此,在进行大规模新能源直流外送系统规划时,需进一步考虑新能源汇集方式对送端系统暂态过电压的影响。

2 调相机高电压等级接入方式

针对某实际大规模新能源直流外送场景,构建了图1所示的直流外送试验仿真系统,其中送端换流站和变电站C合建,直流额定功率为 10^4 MW,额定电压为 ± 800 kV,直流配套水电为 2.2×10^3 MW,近区无火电。配套新能源电站(风电 4×10^3 MW,光伏 1.3×10^4 MW)经35 kV、110 kV、330 kV、750 kV逐级升压后,分散汇集于换流站近区750 kV变电站A、B、C,按新能源容量的20%配置动态无功补偿装置(SVC或SVG),换流母线配置8台300 Mvar的调相机(接于750 kV)。

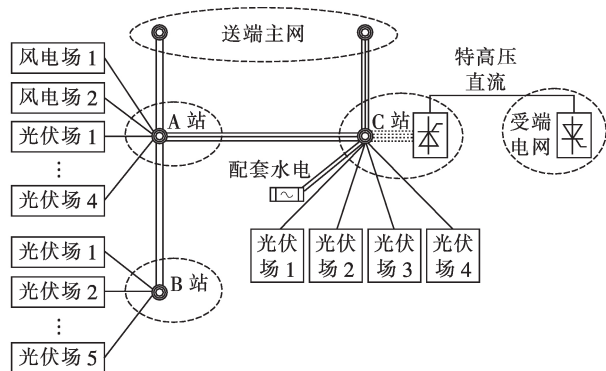


图1 仿真系统图

Fig.1 Simulation system diagram

直流控制系统采用PSD-BPA仿真软件中的DA卡,包括极功率控制、整流侧最小触发角控制、低压限流控制、换相失败预测等环节;风电采用PSD-BPA中的GE风电机模型(双馈型),风电均采用恒功率因数控制模式;光伏控制系统采用PSD-BPA中的BC、BC+卡,其中部分光伏电站采用定交流电压控制模式,选取部分典型控制环节参数如附录中表A1所示。

考虑风光大发运行方式,送端系统水电小开机,换流母线短路电流约为29.2 kA,直流发生换相失败故障后换流母线电压满足不超过1.3 p.u.的要求,然而新能源并网点电压基本均超过1.3 p.u.,如图2所示。图中, U_c 、 U_r 分别为换流站母线电压、新能源并网点电压,两者均为标么值,后同。

2.1 换流站750 kV侧集中接入

换流站集中接入8台调相机不能保证送端系统暂态过电压的要求,因此,本节进一步研究不同数量调相机集中接入换流站750 kV侧对直流故障后系统暂态过电压的影响。

选取3个典型新能源电站,不同数量300 Mvar调相机集中接入换流站750 kV侧,各站的暂态过电压情况如表1所示(表中 U_r 为标么值,后同)。可以看出,随着换流站750 kV侧集中接入调相机数量的增加,各典型新能源电站的暂态过电压逐渐降低,但

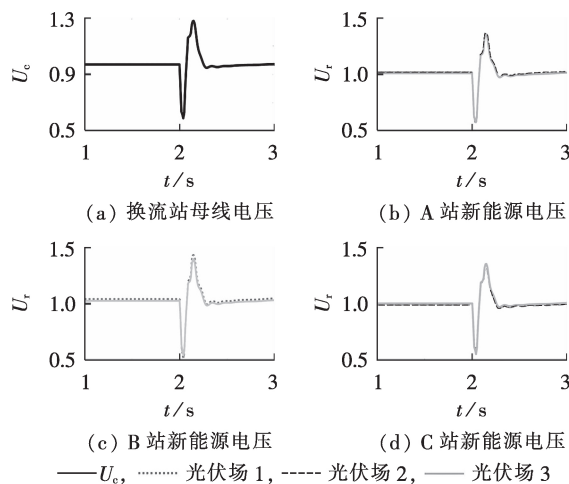


图2 换流母线和新能源并网点电压(750 kV集中配置)
Fig.2 Voltage of converter bus and renewable energy grid-connected point(750 kV centralized configuration)

表1 各新能源并网点电压(750 kV集中配置)

Table 1 Voltage of renewable energy grid-connected point(750 kV centralized configuration)

新能源站	U_r				
	4台 调相机	6台 调相机	8台 调相机	10台 调相机	12台 调相机
A站光伏场3	1.430	1.392	1.362	1.336	1.312
B站光伏场1	1.511	1.465	1.431	1.403	1.379
C站光伏场2	1.419	1.377	1.346	1.319	1.291

即使是集中接入12台调相机,变电站A光伏场3和变电站B光伏场1的并网点电压依然超过了1.3 p.u.。

表2为随着调相机数量的增加,各典型新能源电站并网点暂态过电压降低百分比。可以看出,随着集中换流母线调相机数量的增加,各典型新能源电站暂态过电压降低百分比逐渐减小,更多数量调相机集中接入换流母线的优势并不明显。这是由于随着调相机数量的增加,各新能源站并网点的短路电流水平也逐渐增加,但各新能源站并网点的短路电流增长率逐渐降低,各新能源并网点的强度增加也越来越有限,因此直流故障后暂态过电压的抑制效果也逐渐降低。

表2 各典型新能源电站并网点暂态过电压降低百分比
Table 2 Transient overvoltage decreasing percentage of renewable energy grid-connected point

换流站集中配置调相机数量变化情况	并网点暂态过电压降低百分比/%		
	A站光伏场3并网点	B站光伏场1并网点	C站光伏场2并网点
4台增至6台	3.8	4.6	4.2
6台增至8台	3.0	3.4	3.1
8台增至10台	2.6	2.8	2.7
10台增至12台	2.4	2.4	2.5

由计算结果可知,仅通过在换流母线750 kV侧累加调相机并不能全面解决送端系统的暂态过电压问题,经济性也较差。

2.2 换流站近区 750 kV 变电站分散接入

由于汇集于变电站 A、B、C 的新能源均可能助增系统过电压,而且新能源电站距离调相机布点(换流站 750 kV 侧)的电气距离较远,考虑无功功率的就地平衡,可采用调相机 750 kV 分散配置方案,即变电站 A 和 B 分别配置 2 台 300 Mvar 调相机,变电站 C 配置 4 台 300 Mvar 调相机。

仿真结果如附录中图 A9 所示,与换流站 750 kV 侧集中接入 8 台调相机方案类似,虽然直流发生换相失败故障后换流母线电压满足不超过 1.3 p.u. 的要求,然而新能源并网点电压基本均超过 1.3 p.u.。

由于新能源电站距离调相机的电气距离较远,调相机分散接入高电压等级方案仍有可能无法全面解决送端系统的暂态过电压问题。

表 3 为各新能源电站并网点的暂态过电压情况,可以看出,和调相机集中接入换流站 750 kV 侧方案相比,采用分散接入 750 kV 方案能够略微降低变电站 A 和变电站 B 新能源并网点的暂态过电压,但变电站 C 新能源并网点的暂态过电压情况反而更为严重,调相机分散接入 750 kV 方案的优势仍不明显。

表 3 各新能源并网点电压

Table 3 Voltage of renewable energy grid-connected point

750 kV 变电站	新能源站	U_r	
		分散接入	集中接入
A 站	风电场 1	1.241	1.243
	风电场 2	1.248	1.251
	光伏场 1	1.359	1.362
	光伏场 2	1.358	1.361
	光伏场 3	1.358	1.362
	光伏场 4	1.315	1.318
B 站	光伏场 1	1.423	1.431
	光伏场 2	1.406	1.412
	光伏场 3	1.426	1.431
	光伏场 4	1.391	1.398
	光伏场 5	1.403	1.409
C 站	光伏场 1	1.345	1.334
	光伏场 2	1.357	1.346
	光伏场 3	1.341	1.330
	光伏场 4	1.329	1.318

3 调相机低电压等级接入方式

由前文可知,无论调相机集中还是分散接入 750 kV 侧,虽然可以抑制换流母线的暂态过电压,但并不能有效抑制各新能源并网点的过电压。无功补偿的基本原则是分层分区就地平衡,借鉴这种思想,本文提出了分散式调相机配置方案,通过在 330 kV 侧或 110 kV 侧分散配置小型化调相机(配置在更低电压等级将造成调相机数量过多经济性不佳,不利于统一管理以及不能很好地抑制换流母线过电压等

问题),实现直流故障后送端系统无功功率的“就地消纳”,以容量为 50 Mvar 的小型调相机为例。

3.1 330 kV 分散接入

在换流站 750 kV 侧配置 4 台 300 Mvar 调相机的基础上,分别在变电站 A、B、C 330 kV 母线分散接入不同数量 50 Mvar 的小型调相机,监测换流母线和各新能源并网点直流故障后的暂态过电压情况,如图 3 所示。通过合理布置,最少接入 25 台 50 Mvar 小型调相机,可保证换流母线和各新能源并网点电压均满足不超过 1.3 p.u. 的要求。

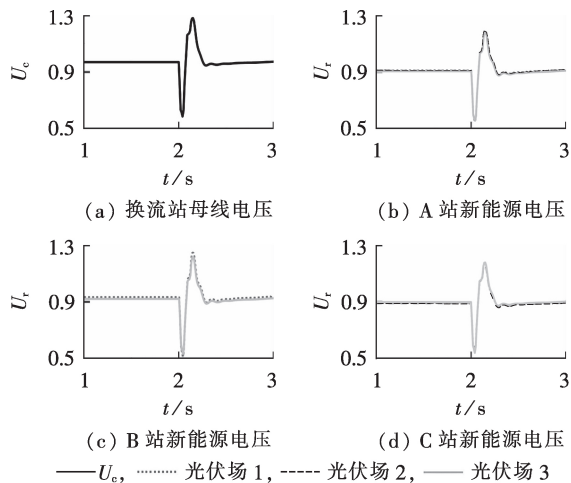


图 3 换流母线和新能源并网点电压(330 kV 分散配置)

Fig.3 Voltage of converter bus and renewable energy grid-connected point(330 kV decentralized configuration)

3.2 110 kV 分散接入

在换流站 750 kV 侧配置 4 台 300 Mvar 调相机的基础上,分别在变电站 A、B、C 110 kV 母线分散接入不同数量 50 Mvar 的小型调相机,监测换流母线和各新能源并网点直流故障后的暂态过电压情况,如附录中图 A10 所示。通过合理布置,最少接入 18 台 50 Mvar 小型调相机,可保证换流母线和各新能源并网点电压均满足不超过 1.3 p.u. 的要求。

本质上,本节所提方案相当于将一定数量接于 750 kV 侧的 300 Mvar 调相机分散至各新能源汇集站,调相机距离新能源站的电气距离越近,对各新能源站并网点暂态过电压的抑制效果越明显。

根据调研,目前 1 台 300 Mvar 的调相机设备投资为 1.10 亿元(未包含安装、土建等费用),1 台 50 Mvar 的调相机投资为 1.58×10^7 元,各方案的经济性对比如表 4 所示。可以看出,与采用换流站 750 kV

表 4 各方案经济性对比

Table 4 Economic comparison of various schemes

方案	调相机投资 / 亿元
750 kV 集中配置	13.20
330 kV 分散接入	8.35
110 kV 分散接入	7.25

侧集中配置12台300 Mvar调相机方案相比,采用330 kV和110 kV分散接入方案可分别节省调相机投资成本约36.7%和45.1%,采用小型化调相机分层分散配置方案的经济性更优。

需要强调的是,本文所提小型化调相机分层分散配置方案,不仅适用于高比例新能源直流外送系统,也同样适用于风火打捆直流外送系统,有利于送端电网暂态电压特性的整体改善。

4 结论

随着新能源的不断发展,我国已规划了多条特高压直流输电工程输送新能源,由于送端网架相对薄弱,因此在送端系统安装调相机成为支撑直流稳定运行的必要条件。针对抑制送端系统暂态过电压的技术需求,本文分析了大规模新能源直流外送系统暂态过电压的影响因素,考虑小型化调相机及其分层分散配置的作用,对比了多种送端系统调相机配置方案。通过仿真算例分析,可得如下结论:

(1)直流故障后送端系统的暂态过电压与直流系统控制参数、新能源发电系统类型、新能源发电系统无功电压控制方式、各变电站新能源的汇集情况等因素均有关;

(2)在大规模新能源直流外送场景,无论在换流站高电压等级侧集中配置或在换流站近区变电站分散配置调相机,虽然能够抑制换流母线的暂态过电压,但仍可能无法有效解决新能源并网点的暂态过电压问题,在考虑经济性的前提下,特高压直流的输送能力仍将可能受到限制;

(3)通过在各新能源汇集站低电压等级侧分散配置小型化调相机,不仅可以全面解决送端系统的暂态过电压问题,还能进一步提高经济性,配置小型化调相机对于新能源直流外送系统是一个较优选择。

本文对于大规模新能源直流外送系统调相机配置的研究主要基于大系统机电暂态仿真计算,后续将进一步研究适合该应用场景的电压安全性评估方法,通过理论分析得出大规模新能源直流外送系统调相机的最优配置方案。

致 谢

东方电机厂、哈尔滨电机厂、上海电机厂提供了小型化调相机技术和经济相关参数,在此一并表示感谢。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] Global Wind Energy Council. Global Wind Statistics 2017[EB/OL]. (2018-02-14)[2018-11-19]. <https://wenku.baidu.com/view/>

e9caf59d3086bceb19e8b8 f67c1cfad6195fe90a.html.

- [2] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [3] 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.
- [4] 舒印彪,张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(31):1-6.
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 1-6.
- [5] 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.
- [6] 屠竞哲,张健,曾兵,等. 交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.
- [7] 黄华,潘学萍,李乐,等. 并网大容量调相机对交直流电力系统无功电压灵敏度的影响[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):162-167.
HUANG Hua, PAN Xueping, LI Le, et al. Effect of integrated large capacity synchronous condenser on reactive power and voltage sensitivity for AC/DC power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 162-167.
- [8] 李志强,蒋维勇,王彦滨,等. 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J]. 大电机技术,2017(4):15-22.
LI Zhiqiang, JIANG Weiyong, WANG Yanbin, et al. Key technical parameters and optimal design of new types of large capacity synchronous condenser[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2017(4): 15-22.
- [9] TELEKE S, ABDULAHOVIC T, THIRINGER T, et al. Dynamic performance comparison of synchronous condenser and SVC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1606-1612.
- [10] 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 synchronous condenser and power electronics reactive-power compensation devices in applications of UHV DC/AC Grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095-2102.
- [11] 桑建斌,包明磊,李玉平,等. 300 Mvar调相机继电保护的分析和改进[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):217-223.
SANG Jianbin, BAO Minglei, LI Yuping, et al. Analysis and improvement of relay protection of 300 Mvar synchronous condenser[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 217-223.
- [12] 张靖,程时杰,文劲宇,等. 通过选择SVC安装地点提高静态电压稳定性的新方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(34):7-11.

- ZHANG Jing, CHENG Shijie, WEN Jinyu, et al. A novel steady-state voltage stability enhancement method based on SVC allocation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 7-11.
- [13] 张红丽, 刘福锁, 李威, 等. 动态无功补偿装置提高多馈入直流恢复的布点方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 133-138.
- ZHANG Hongli, LIU Fusuo, LI Wei, et al. Site selection for dynamic reactive power compensation and improvement of recovery from commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 133-138.
- [14] 周勤勇, 张彦涛, 贺海磊, 等. 多直流馈入电网动态无功补偿选点实用方法[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1753-1757.
- ZHOU Qinyong, ZHANG Yantao, HE Hailei, et al. A practical site selection method for dynamic reactive power compensation in multi-infeed DC power grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1753-1757.
- [15] 李帅虎, 曹一家, 刘光晔. 基于阻抗模裕度指标的动态无功补偿装置优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3791-3798.
- LI Shuaihu, CAO Yijia, LIU Guangye. Optimal allocation method of dynamic var compensator based on the impedance modulus margin index[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3791-3798.
- [16] 袁志昌, 刘文华, 宋强, 等. 基于暂态电压稳定指标的动态无功优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 17-21.
- YUAN Zhichang, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. Optimal allocation method of dynamic var compensation based on transient voltage stability index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 17-21.
- [17] 张勇军, 韩东昆, 刘巍. 受端电网静态/动态无功补偿综合优化[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 32-35.
- ZHANG Yongjun, HAN Dongkun, LIU Wei. Comprehensive optimization of static/dynamic reactive power compensation in thereceiving end[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 32-35.
- [18] 黄小庆, 阮驰骋, 邹佳芯, 等. 考虑电网特性的动态无功优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 127-133.
- HUANG Xiaoqing, RUAN Chicheng, ZOU Jiaxin, et al. Optimal dynamic var configuration considering grid characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 127-133.
- [19] 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.
- [20] 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 HVDC control system for mitigating AC transient overvoltage on rectifier station[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 721-728.

作者简介:



索之闻

索之闻(1988—),男,河南郑州人,博士,通信作者,主要研究方向为高压直流输电系统设计及交直流混合电力系统安全稳定分析(E-mail: suozhiwen@126.com);

刘建琴(1972—),女,河北定州人,教授级高级工程师,主要研究方向为电力系统规划与设计;

蒋维勇(1979—),男,江苏盐城人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为高压直流输电系统设计及交直流混合电力系统安全稳定分析。

Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system

SUO Zhiwen¹, LIU Jianqin¹, JIANG Weiyong¹, LI Zhiqiang², YANG Lin¹

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: In view of the technical requirements for suppressing transient overvoltage of power grid at sending end, firstly the influencing factors of transient over-voltage of the power grid at sending end are analyzed. Then a test system of DC transmission is established, based on electromechanical transient simulation, considering distributed synchronous condenser and decentralized hierarchical configuration, the synchronous condenser configuration scheme of centralized and decentralized accessing to different voltage levels are separately proposed. Finally, by comparing different schemes, the synchronous condenser configuration suggestions for large-scale renewable energy DC transmission system are given. The simulative results show that the decentralized configuration of synchronous condenser at low voltage side of each renewable energy collecting stations can not only solve transient over-voltage problem of the sending end, but also further improve the economy.

Key words: electric power systems; renewable energy DC transmission system; security and stability; transient analysis; transient over-voltage; distributed synchronous condenser; decentralized hierarchical configuration

附录

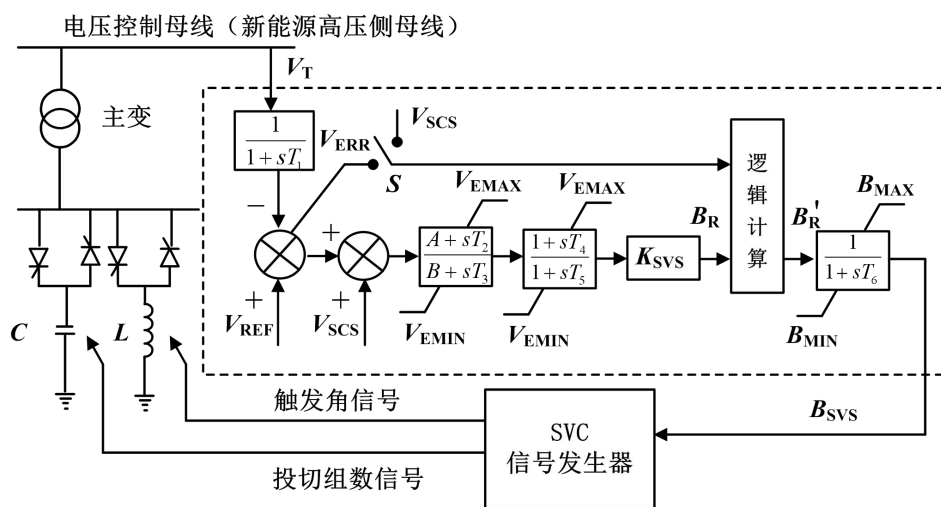


图 A1 SVC 结构及控制器框图

Fig.A1 SVC structure and controller diagram

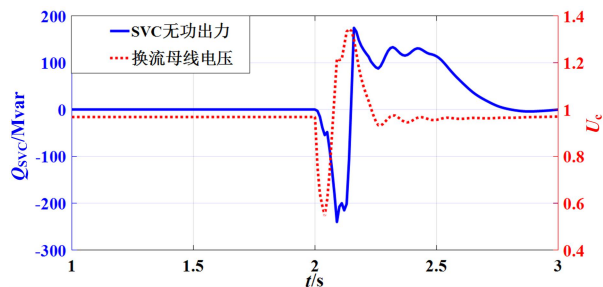


图 A2 SVC 无功功率 Q_{svc} 、电压（标么值）特性曲线

Fig.A2 SVC reactive power and voltage characteristic curve

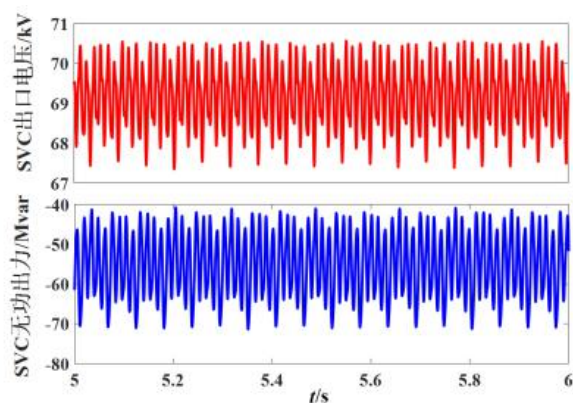


图 A3 SVC 无功出力出现振荡

Fig.A3 SVC reactive power appears to oscillate

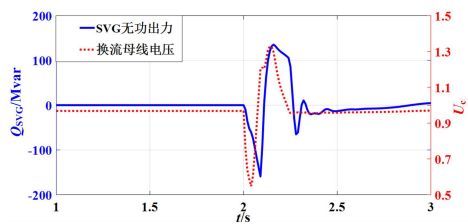


图 A4 SVG 无功功率 Q_{SVG} 、电压 U_c (标么值) 特性曲线
Fig.A4 SVG reactive power and voltage characteristic curve

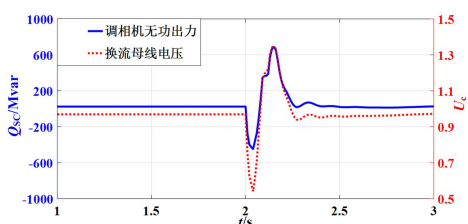


图 A5 调相机无功功率 Q_{SC} 、电压 U_c (标么值) 特性曲线
Fig.A5 Synchronous condenser reactive power and voltage characteristic curve

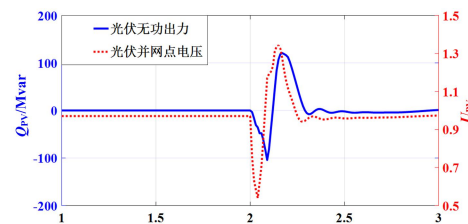


图 A6 光伏无功功率 Q_{PV} 、电压 U_{PV} (标么值) 特性曲线
Fig.A6 PV reactive power and voltage characteristic curve

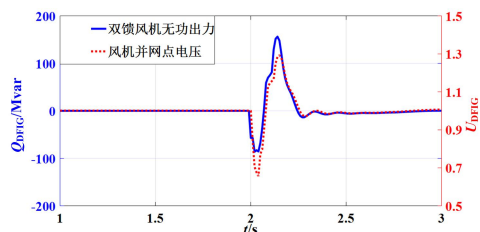


图 A7 双馈风机无功功率 Q_{DFIG} 、电压 U_{DFIG} (标么值) 特性曲线
Fig.A7 DFIG reactive power and voltage characteristic curve

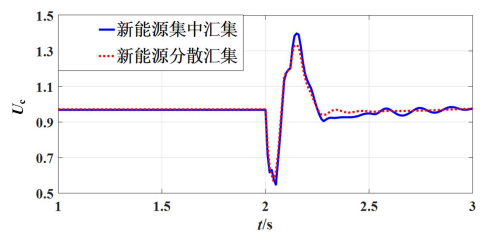


图 A8 换流站母线电压 (标么值)
Fig.A8 Converter bus voltage

表 A1 典型控制环节参数
TableA1 Typical control link parameters

控制环节	参数名称	参数值
直流控制	最大触发角控制增益	0.15
	最大触发角控制时间常数	0.012
	VDCOL 电压上升滤波时间常数	0.022
	VDCOL 电压下降滤波时间常数	0.02
	定电流控制比例增益	2.8
	定电流控制积分时间常数	0.011
	换相失败预测增益	0.055
光伏无功控制	换相失败预测输出角度时间常数	0.02
	无功测量环节时间常数	0.03
	无功外环比例环节放大倍数	5
	无功外环积分环节放大倍数	20

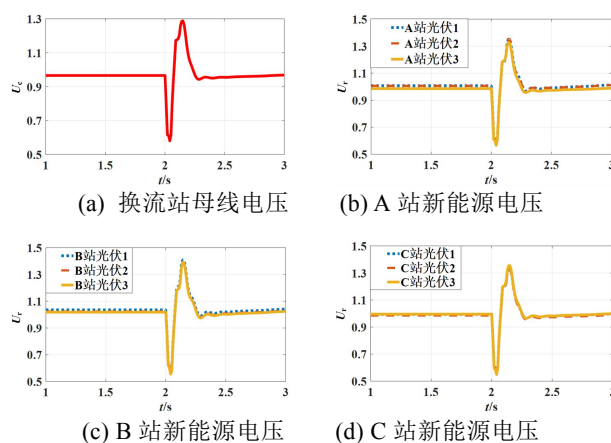


图 A9 换流母线和新能源并网点电压（750kV 分散配置）

Fig.A9 Voltage of converter bus and renewable energy grid-connected point(750kV decentralized configuration)

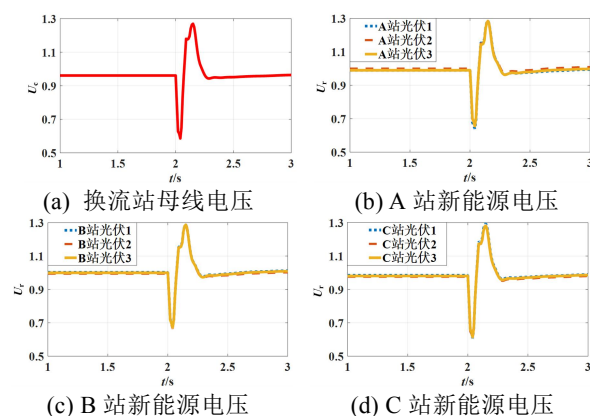


图 A10 换流母线和新能源并网点电压（110kV 分散配置）

Fig.A10 Voltage of converter bus and renewable energy grid-connected point(110kV decentralized configuration)