

大规模新能源并网直流工程送端电网 暂态过电压抑制策略研究

张桂红, 王世斌, 田旭, 刘飞, 张君, 李红霞

国网青海省电力公司经济技术研究院, 青海 西宁

收稿日期: 2021年8月26日; 录用日期: 2021年9月17日; 发布日期: 2021年10月20日

摘要

特高压直流目前是华北、东北、西北等“三北”地区新能源输送至中东部负荷中心的重要方式。由于送端电网相对薄弱, 特高压直流在暂态过程中无功大范围波动导致送端电网电压剧烈变化, 严重威胁新能源发电和送端电网的安全稳定运行。为此, 本文研究不同类型动态无功补偿装置对直流暂态电压波动的影响, 提出大规模新能源并网直流送出系统调相机优化配置方案, 研究多目标调相机最优配置模型及其求解技术, 针对青豫直流提出能满足其近期及远期输送能力的无功配置方案, 保证青海送端交直流混合输电系统的安全稳定运行, 同时为新能源通过特高压直流外送的送端电网规划设计起到重要指导作用。

关键词

大规模新能源, 直流输电, 暂态过电压, 无功补偿, 优化配置, 输电能力

Research on Suppression Strategies for Transient Overvoltage of Export Power Network of Large-Scale New Energy Grid-Connected DC Project

Guihong Zhang, Shibin Wang, Xu Tian, Fei Liu, Jun Zhang, Hongxia Li

State Grid Economic and Technological Research Institute of Qinghai Electric Power Company, Xining Qinghai

Received: Aug. 26th, 2021; accepted: Sep. 17th, 2021; published: Oct. 20th, 2021

Abstract

UHV DC is currently an important way to transport new energy from the “Three Norths” regions of

文章引用: 张桂红, 王世斌, 田旭, 刘飞, 张君, 李红霞. 大规模新能源并网直流工程送端电网暂态过电压抑制策略研究[J]. 电力与能源进展, 2021, 9(5): 237-249. DOI: 10.12677/aepe.2021.95026

North China, Northeastern China, and the Northwestern District to the load centers in the central and eastern regions. Due to the relatively weak power grid at the sending end, large-scale reactive power fluctuations of UHV DC in the transient process lead to drastic changes in the voltage of the sending end grid, which seriously threatens the safe and stable operation of new energy power generation and the sending end grid. To this end, this paper studies the impact of different types of dynamic reactive power compensation devices on DC transient voltage fluctuations, proposes large-scale new energy grid-connected DC transmission system, and studies the optimal configuration model of the multi-objective controller and its solution technology. For Qingyu DC, propose a reactive power configuration plan that can meet its short-term and long-term transmission capacity, ensure the safe and stable operation of Qinghai's sending-end AC/DC hybrid transmission system, and plan for the sending-end power grid of new energy through UHV DC transmission Design plays an important guiding role.

Keywords

Large-Scale New Energy, DC Transmission, Transient Overvoltage, Reactive Power Compensation, Optimized Configuration, Transmission Capacity

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

直流输电具有输送距离远、输送容量大、运行损耗小等优点，近年来我国特高压直流输电技术得到了快速发展，形成了以西南水电和西北新能源为送端电网，以东部负荷中心为受端电网的交直流混联复杂多变电网结构[1]。青豫特高压直流输电工程的建设与快速发展，充分考虑了我国能源与负荷逆向分布的特点，提高了大规模清洁能源的消纳，符合国家能源发展“十三五”规划。然而，随着光伏等清洁能源并网规模的不断增大，特高压直流输电在传输有功功率的同时也消耗大量无功功率，将对电网的电压稳定问题带来新的挑战。交直流严重故障引发直流闭锁后，换流站与其近区交流电网发生大范围的无功交换，缺乏有效动态无功支撑的新能源机端等极易触发其自身过电压保护动作装置，引发大规模光伏连续脱网，严重威胁电网的安全运行。

同步补偿器、静态同步补偿器(STATCOMs)和调相机等无功补偿设备能够为电网提供快速的无功支持，可以有效地提高电网的暂态电压稳定水平。调相机实际上是一台不带机械负载运行的同步电动机，与电力电子无功补偿装置相比，可以提高系统的短路比、增强系统的暂态稳定性，并且其物理性自发的、无延时的快速暂态响应能力对直流闭锁、换相失败带来的暂态过电压具有更好的抑制效果[2]。然而现代网络节点众多、规模庞大、无功设备造价昂贵，维护成本高，不可能在每个节点都装设足够容量的无功补偿设备，因此，如何有效规划与优化无功补偿装置的配置、提高电网的安全稳定运行以及运行经济性具有重要意义，越来越受到学术界和工业界的重视[3] [4]。

目前送端系统调相机原则上均配置在换流站，用以抑制直流典型故障下系统暂态过电压。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，考虑无功补偿“就地平衡”原则，大容量调相机集中配置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。因此，对与新能源直流外送系统亟需考虑小容量调相机的分布式优化配置[5]。

2. 青豫直流系统研究边界条件

2.1. 青豫直流近区暂态过电压情况

青豫直流工程送端位于青海省海南藏族自治州境内，受端位于河南省驻马店地区，额定输送功率为 800 万千瓦，满送电量约 405.5 亿千瓦时，额定直流电压 ± 800 千伏。青海海南地区在冬季方式下，由于青海全网常规电源开机较少，而新能源开机较多，新能源占比极高，青豫直流工程送端存在较为严重的暂态过电压问题。

在直流输送 400 万千瓦运行方式下开展暂态过电压特性分析。计算采用 3 次换相失败故障，后直流闭锁进行，根据 3 次换相失败的仿真计算结果，在第 2 次换相失败时，塔拉地区新能源暂态过电压达到 1.39 p.u.，最高点在汇明站，合乐地区新能源暂态过电压为 1.35 p.u.，最高点在红旗#1 站，香加地区新能源暂态过电压为 1.33 p.u.，最高点在莫合站。其中，塔拉地区的汇明站，合乐地区的红旗#1 站、红旗 2# 站暂态过电压较为严重，在第三次换相失败时均达到接近 1.4 p.u. 的水平。如果要控制新能源过电压不超过 1.3 p.u.，则需要限制青豫直流输电能力或者新能源出力，即青豫直流工程 2020 年投产后不具备 400 万千瓦输电能力。

远景年根据目前掌握的电源投产情况，后续配套电源主要还是风电和光伏，送端电网新能源侧的暂态过电压问题仍然可能限制青豫直流工程输送新能源电力的能力，为抑制新能源侧暂态过电压，需进一步提升直流近区无功补偿能力，合理规划和布局无功补偿装置的配置。

2.2. 影响暂态过电压的关键因素

2.2.1. 光伏机组发电

光伏发电系统的并网控制由光伏并网逆变器实现，常采用电压外环、电流内环的双闭环控制策略。电压外环控制逆变器直流侧电压实现前后级之间直流侧电压的稳定，减少电压波动引起的能量损耗，提高光伏发电系统的能量利用率；电流内环控制跟踪并网指令电流，根据指令进行电网的功率调节，实现网侧单位功率因数电流控制，最终实现并网运行。

当光伏逆变器进入故障穿越瞬间，逆变器控制切换至故障穿越模式，有功电流、无功电流根据机端电压变化采取相应的控制措施：在低电压期间，无功电流优先输出，支撑电网电压，有功电流被限制；机端电压恢复后，有功电流按照一定速率恢复至故障前状态。当电网发生连续低、高电压故障时，由于测量、滤波等环节，光伏逆变器响应电网电压变化大约有 10~20 ms 延迟，因此容易在机端产生过电压“反调”现象[6] [7] [8]。

2.2.2. 风电机组发电

主流的风力发电机型包括双馈风力发电机和直驱永磁同步发电机。直驱风机的暂态过电压特性与光伏发电系统类似，对新能源机端的过电压有助增作用，而双馈风力发电机采用绕线式转子异步机，转子通过背靠背电压源变换器连接于电网，控制转子励磁，实现机械与电气转子频率解耦和电网与转子频率的匹配。电力电子的应用提供了有功和无功功率控制，能主动控制电压[9]。直驱永磁同步发电机采用全功率变换器并入电网，实现与电网完全解耦，可以提供比双馈风力发电机更宽的运行风速范围和更宽范围的无功/电压控制能力[10]。同时，能够控制调节过程中暂态过电压峰值，避免机端过电压超过限值而脱网[11]。因此，就暂态过电压控制而言，双馈风机比直驱风机性能更优。

2.2.3. 动态无功补偿

直流系统发生换相失败时，交流电压发生剧烈变化，交流电压从低电压过渡到高电压仅仅经过 1~2

个周波。SVG、SVC 等容易出现功率反调,在低电压时,SVG、SVC 在控制系统作用下发出大量无功功率,在系统电压快速过渡到过电压时,SVG、SVC 的控制滞后导致无功功率无法快速由发无功转变为吸无功(相对于初始状态),导致 SVG、SVC 在系统过电压时仍然支撑系统电压,进而出现助增过电压的情况[12] [13] [14]。

青海海南地区新能源发电场站的动态无功补偿配置基本情况如下:新能源场站内一般均按装机容量的 25%配置动态无功补偿装置;新能源场站内配置的动态无功补偿装置类型为 SVG。

海南地区已投产新能源汇集站的 SVC/SVG 配置情况方式见表 1。

Table 1. SVC/SVG configuration of Hainan Qinghai in 2020 (Mvar)
表 1. 2020 年青海海南 SVC/SVG 配置情况(Mvar)

场站	SVC	SVG
华阳		2 × 50
青切吉 C (沙柳)		6 × 45
青共塔(珠玉)		4 × 2 × 45
共和(思明)	2 × 78	2 × 2 × 30 + 4 × 60
汇明	4 × 78	
黄河共和		50 + 50 + 60 + 32.5
切吉西		2 × 4 × 35 + 2 × 2 × 40 + 2 × 50
切吉 A (那仁)		2 × 2 × 26.5 + 2 × 30
德汇 A (莫合)		3 × 4 × 35

2.3. 计算条件说明

2.3.1. 运行方式安排

投产初期运行方式安排中,青海主力电厂拉西瓦、龙羊峡、李家峡、公伯峡、积石峡、汉东火电厂均只开 1 机,总开机容量约 440 万千瓦,负荷按 1000 万千瓦考虑,青豫直流外送 400 万千瓦。远景年分析在直流输电 600 万千瓦阶段,青豫直流配套风电和光伏进一步落实,而配套光热仍未落实为基础,继续研究以动态无功补偿优化为基础,提出满足直流输电 600 万千瓦的送端动态无功补偿方案。其次以第二批新能源中光伏进一步落实为基础,直流外送能力按 800 万千瓦考虑,重点分析光热电源投产对直流输电能力的影响,以及在光热机组投产的基础上是否需要继续配置动态无功补偿。

在具体方式中,海南光伏按照满出力安排,其他地区光伏按照 70%出力,海南地区风电部分关停,海西地区风电按照 30%的同时率确定出力。从青海全网来看,光伏同时率约为 73%,风电同时率约为 33%。

2.3.2. 故障方式设置

根据电力系统安全稳定导则相关要求,直流连续 2 次换相失败,系统需保持稳定运行,直流 3 次换相失败后,根据系统情况,可以采取针对性稳定控制措施,但是第三道防线不应该动作。第三道防线不动作,就要求新能源在 3 次换相失败故障过程中不出现无序脱网[15] [16] [17] [18]。

可能引起青豫直流工程送端电网暂态稳定问题的故障如下:

- 1) 交流线路单相永久短路故障 N-1;
- 2) 交流线路三相永久短路故障 N-1;
- 3) 直流单极闭锁;

- 4) 直流双极闭锁;
- 5) 直流一次换相失败;
- 6) 直流单极两次重启动(成功/失败);
- 7) 直流双极一次重启动成功;
- 8) 青豫直流发生 3 次换相失败后 50 ms, 直流双极闭锁。

本文采用较严苛的直流故障方式, 即青豫直流发生 3 次换相失败后闭锁故障, 开展对海南近区暂态过电压的仿真分析。主要约束为整个故障过程中新能源出口处暂态过电压不超过 1.3 p.u.。

3. 动态无功补偿设备的比较与选择

3.1. 动态无功补偿设备的制造技术比较

目前, 电网中常用的动态无功补偿设备主要有三类, 分别为静止无功补偿器(SVC), 静态无功发生器(SVG)和同步调相机[19]。三类设备的主要技术水平和制造技术具体见表 2。

Table 2. Technical level and manufacturing technology of commonly used dynamic reactive power compensation devices
表 2. 常用动态无功补偿装置技术水平和制造技术

	调相机	SVC	STATCOM
设备类型	旋转设备, 提供惯量和短路电流	静止设备	静止设备
无功特性	无功输出受系统电压影响小, 具备短时强励能力(2.5 倍过载), 能进相运行	与电压平方成正比	基本与系统电压成正比
响应时间	瞬时(磁链守恒)	20~60 ms	<10 ms
调节速度	0.5~1 s 达到峰值	40~100 ms 达第 1 峰值	40~100 ms 达第 1 峰值
有功损耗	1.5%	0.8%	1%
占地面积	约为同容量 SVC 的 1/3	占地面积较大	约为同容量 SVC 的 1/3
使用寿命	30 年	10 年	10 年

3.2. 动态无功补偿设备对暂态过电压的响应差异

直流系统发生换相失败时, 交流电压发生剧烈变化, 交流电压从低电压过渡到高电压仅仅经过 1~2 个周波。SVG、SVC 等容易出现功率反调, 在低电压时, SVG、SVC 在控制系统作用下发出大量无功功率, 在系统电压快速过渡到过电压时, SVG、SVC 的控制滞后导致无功功率无法快速由发无功转变为吸无功(相对于初始状态), 导致 SVG、SVC 在系统过电压时仍然支撑系统电压, 进而出现助增过电压的情况[20] [21] [22]。

调相机适合应对换相失败故障引发的交流电压先低后高暂态过电压问题, 调相机性能优势主要体现在可以在瞬态、暂态和稳态全时间尺度提供无功补偿和电压支撑[23]。瞬态方面, 在电网发生故障导致电压跌落的瞬间, 调相机利用其强劲的“爆发力”, 快速释放大量的无功功率, 减少电网电压跌落的幅度和速度, 该特性通常在几到几十个毫秒范围内发挥作用。暂态方面, 在故障恢复期间, 电网电压还较低, 调相机励磁系统可以进行强励, 从而在数秒到数十秒的时间内提供超过调相机额定容量 1.5 倍甚至更多的无功支撑, 进而帮助电网电压恢复。稳态方面, 调相机可以在设计范围内进行无功的连续调节, 既可以发出容性无功, 也可以发出感性无功[24] [25] [26]。此外, 调相机在进行无功补偿的同时, 还能提供短路容量和转动惯量, 从而提高电网稳定性能[27]。

对于目前大规模新能源基地出现的暂态过电压问题, 调相机是合适的选择。

3.3. 分布式调相机接入方案

3.3.1. 调相机技术性能

根据前期分布式调相机厂家的初步设计,分布式调相机性能指标如下。根据与 300 Mvar 调相机比较,分布式调相机的次暂态、暂态性能更优。分布式调相机的次暂态电抗要小于大调相机,暂态短路时间常数小于大调相机。分布式调相机的进相能力可以和滞相能力一致,均为额定容量。分布式调相机性能参数见表 3。

Table 3. Distributed tuning camera performance parameters

表 3. 分布式调相机性能参数

名称	符号	单位	系统要求数值
额定容量	SN	MVA	50
额定电流	IN	kA	2.75
额定电压	UN	kV	10.5
额定频率	fN	Hz	50
额定转速	nN	r/min	3000
进相运行能力		Mvar	-50
直轴同步电抗(饱和值/不饱和值)	Xd	%	/
直轴瞬变电抗(饱和值/不饱和值)	Xd'	%	<0.14
直轴超瞬变电抗(饱和值/不饱和值)	Xd''	%	<0.11
直轴瞬变电流衰减时间常数	Td'	s	<0.8
直轴定子绕组开路时转子绕组的瞬变时间常数	Td0'	s	宜不大于 8
直轴定子绕组开路时转子绕组的超瞬变时间常数	Td0''	s	/

分布式调相机与大调相机相比,采用纯空冷方案,无需配置造价昂贵的冷热交换装置。根据哈电、东电、上电和南瑞继保的综合评估,单台机组造价小于 1800 万元。考虑到分布式调相机均采用户外配置,工程施工量较少,暂按 400 万元考虑,每台分布式调相机投资共计 2200 万元。

3.3.2. 调相机容量选择

目前青海地区的光伏电站普遍采用 240 MVA~360 MVA 的汇集变压器,在每台变压器下配置 1 台 50 Mvar 的调相机,相当于给平均 300 Mvar 的新能源提供无功补偿,根据计算 50 Mvar 的调相机的惯量仅相当于 20 MW 的发电机组,根据导则要求提供惯量支撑的要求,50 Mvar 调相机提供的惯量仍然相当有限。因此从系统需求来看,建议采用 50 Mvar 的调相机,综合经济技术比较,不建议采用更小容量的分布式调相机。

3.3.3. 调相机接入方案

通过对直流近区暂态过电压分布特性研究,得出海南地区暂态过电压水平按换流母线→汇集升压站→新能源机端逐步提高,暂态过电压水平最高的位置,均位于新能源机组的机端。

新能源主要通过 35 kV 汇集线路汇集,若考虑在新能源电站配置分布式调相机(50 Mvar),将存在如下问题:

- 1) 分散广,每个站均进行补强可能造成调相机的配置数量过大;

2) 单个站容量小, 装机容量多在 50 MW~200 MW 之间, 单台机组容量可能造成电站动态无功过补偿;

3) 大量小型化调相机分散配置在新能源电站侧, 调度部门运行控制较为困难, 且不利于同一汇集站内不同主变之间的动态无功相互支援。

因此, 初步确定分布式调相机配置在汇集升压站。考虑分布式调相机容量为 50 Mvar, 因此侧重考虑 330 kV、110 kV 以及 35 kV 等电压等级接入。只有在新能源汇集站不具备配置条件时, 比如变电站无法扩建, 汇集变压器短路电流超标等, 才考虑在新能源电站配置一定数量的分布式调相机。

目前, 青海新能源汇集方式主要有两种类型: 35 kV 直接升压至 330 kV 和 35 kV/110 kV/330 kV 汇集。两种方式下, 新能源汇集站和新能源电站出口处通常均配置 SVG/SVC, 配置容量约为新能源装机容量 50%。

1) 35 kV/110 kV/330 kV 汇集方式

对于此类汇集方式, 升压变压器的 110 kV 一般为一段母线, 因此推荐分布式调相机可集中接入 110 kV 母线: 一方面, 能较好的抑制新能源暂态过电压; 另一方面, 相同容量等级的分布式调相机变压器, 采用 110 kV 电压等级接入电网在绝缘要求、设备造价等方面均优于采用 330 kV 电压等级接入。海南地区新能源汇集升压站结构详见图 1。

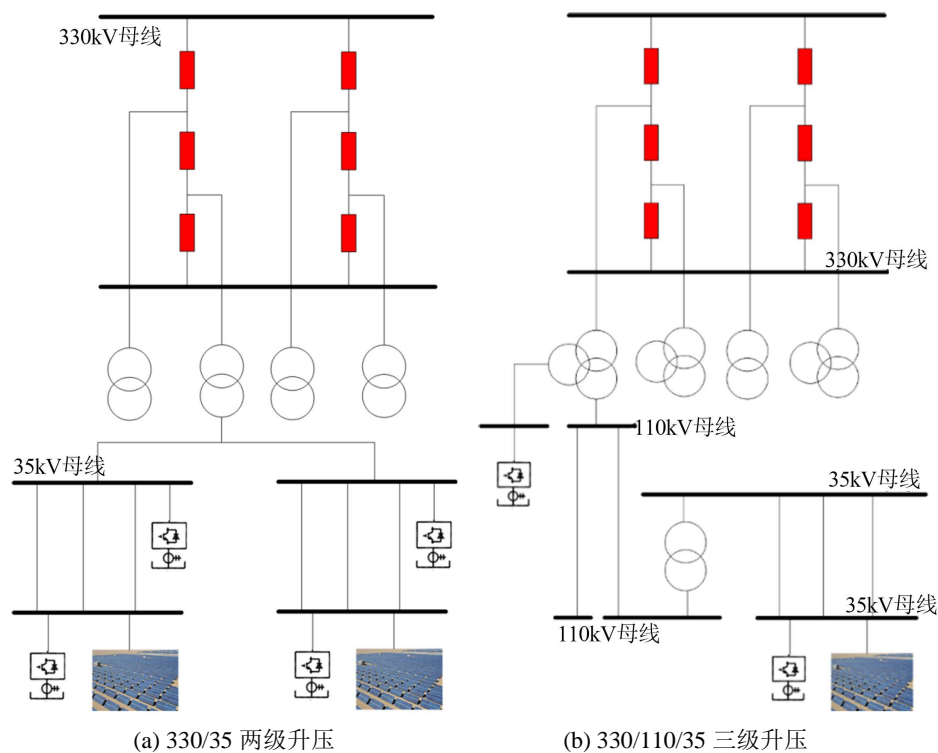


Figure 1. Hainan new energy convergence boost station structure
图 1. 海南新能源汇集升压站结构

2) 35 kV 直接升压至 330 kV 汇集方式

对于此类汇集方式, 升压变压器的 35 kV 侧一般均采用单母线分段结构、且各段母线之间无母联开关。以远景年南汇 A (红旗#1) 为例, 对分布式调相机分别配置在 330 kV 和 35 kV 侧分别开展仿真计算, 具体结果见图 2、图 3。仿真表明, 越接近新能源侧, 分布式调相机对过电压的抑制效果越好。

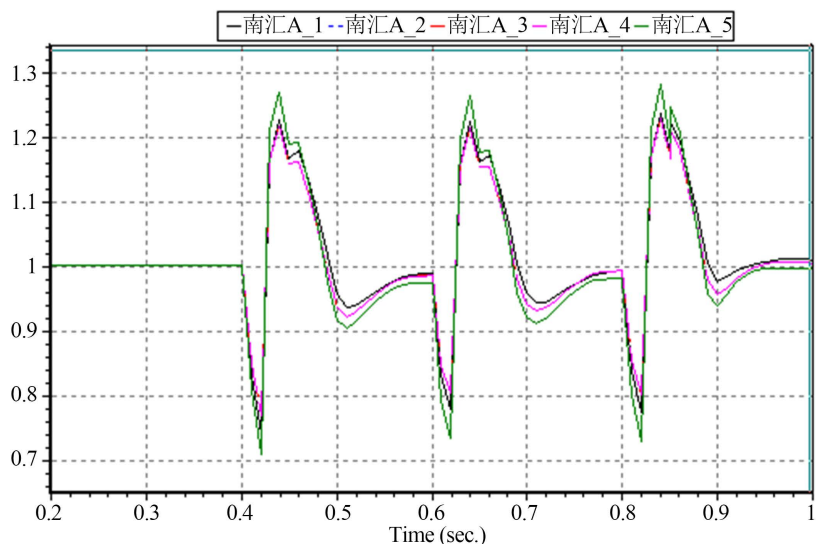


Figure 2. 4 distributed control cameras are connected to the 35 kV side #1~#4 bus
图 2. 4 台分布式调相机分别接入 35 kV 侧#1~#4 段母线

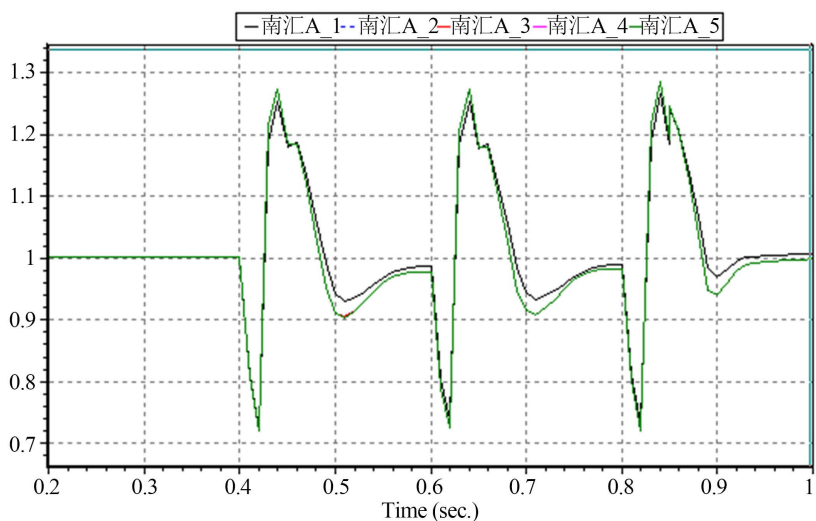


Figure 3. 4 distributed control cameras are centrally connected to 330 kV bus
图 3. 4 台分布式调相机集中接入 330 kV 母线

4. 青豫直流近区新能源汇集站无功补偿配置方案

4.1. 投产初期配置方案

根据计算，配套电源沙珠玉、切吉西为风电场，其本身不存在暂态过电压超标的问题。切吉西距离塔拉变线路较长，配置分布式调相机对汇明暂态过电压抑制效果较差，沙珠玉需要经过 750 kV 电压等级才能影响到汇明，对汇明暂态过电压抑制效果也不佳。

在冬季日间光伏大发方式，海南地区光大风小运行方式下，青豫直流输电 400 万千瓦，海南地区光伏出力 640 万千瓦，风电出力 100 万，甘青断面往甘肃送端 400 万千瓦运行方式下。开展海南地区分布式调相机配置方案计算。仿真计算表明，青豫直流送电 400 万千瓦时，需要在海南地区配置 15 台分布式调相机，才能保证直流“2+1”闭锁故障后新能源机组暂态电压不超 1.3 p.u.。

下表给出了调相机基本配置方案，在合乐 750 kV 变电站下的红旗#1、红旗 2#、红旗#3 每台 330 kV 汇集变压器下各配置一组 50 Mvar 的调相机，同时在珠玉汇集站每台 330 kV 汇集变压器下各配置一组 50 Mvar 的调相机，具体配置方案见表 4。

Table 4. DC 4 million distributed camera supporting program in Hainan area

表 4. 直流 400 万台海南地区分布式调相机配套方案

塔拉		合乐		香加	
汇明	0	南汇 A (红旗#1)	5		
黄河共和	0	南汇 B (红旗 2#)	4		
共和 (思明)	0	南汇 C (红旗#3)	2		
共塔 (珠玉)	4				
切吉 B (切吉西)	0				
切吉 C (沙柳)	0			德汇 A (莫合)	0
华扬	0	切吉 C (沙珠玉)	0	切吉 A (那仁)	0
小计	4	小计	11	小计	0
	合计				15

直流投产初期，海南地区配置 15 台分布式调相机后，青豫直流送电 400 万千瓦时发生“2+1”闭锁故障，新能源机组的暂态过电压最严重地区塔拉地区仿真计算结果见图 4。

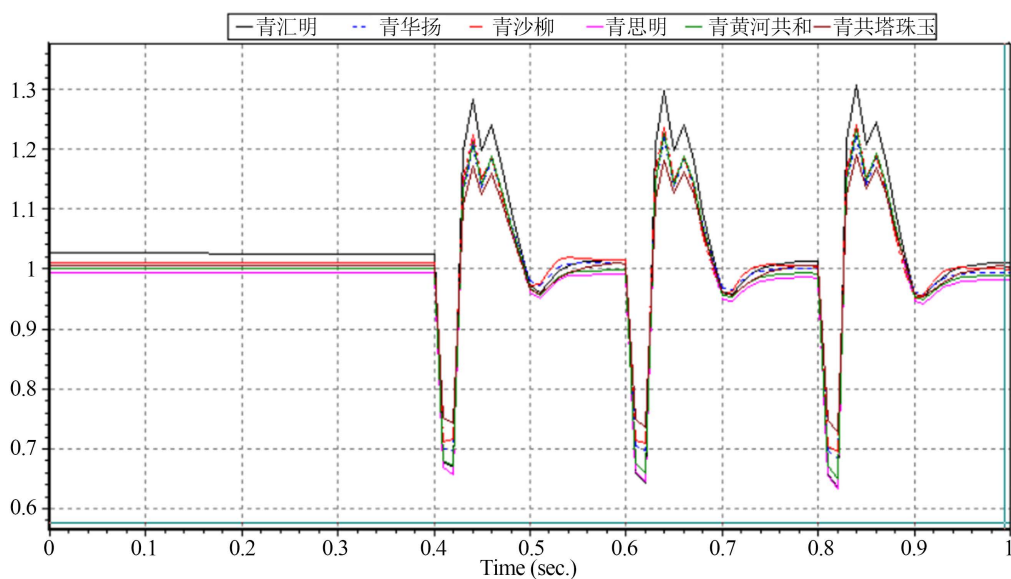


Figure 4. Tara transient overvoltage-equipped with 15 distributed control cameras to send 4 million kilowatts of direct current (p.u.)

图 4. 塔拉暂态过电压配置 15 台分布式调相机直流外送 400 万千瓦(p.u.)

由仿真结果可知：在新能源汇集站分散配置至少 15 台分布式调相机后，青豫直流发生“2+1”闭锁故障，海南地区新能源机组的暂态电压均不超 1.3 p.u.。其中，配置调相机后，过电压最严重的为汇明汇集站光伏出口处电压，压升达到了 0.28 p.u.。

总之，将部分自身暂态过电压不超标的配套新能源的分布式调相机优化调换至同一业主存量新能源场站，最终取消沙珠玉、切吉西分布式调相机配置，在共塔珠玉增加 4 台调相机，共计配置 15 台分布式调相机，可以解决送端暂态过电压问题。

4.2. 远景年配置方案

4.2.1. 直流送电 600 万千瓦

通过仿真计算，青豫直流送电 600 万千瓦时，15 台分布式调相机不足以解决送端近区的暂态过电压问题，需要增加分布式调相机的配置台数，以保证直流“2+1”闭锁故障后新能源机组暂态电压不超 1.3 p.u.。在投产初期 15 台的基础上，在后期投产的 200 万光伏和 100 万千瓦风电配套电源的汇集站配置共计 12 台分布式调相机，其中红旗#4、#5 各 4 台，切吉 E 风电场配置 4 台分布式调相机，具体调相机配置方案见表 5。

Table 5. DC 6 million distributed camera supporting program in Hainan area

表 5. 直流 600 万台海南地区分布式调相机配套方案

塔拉		合乐		香加	
汇明	0	南汇 A (红旗#1)	5		
黄河共和	0	南汇 B (红旗 2#)	4		
共和 (思明)	0	南汇 C (红旗#3)	2		
同塔 (珠玉)	4	南汇 D (红旗#4)	4		
切吉 B (切吉西)	0	南汇 E (红旗#5)	4	德汇 A (莫合)	0
切吉 C (沙柳)	0			切吉 A (那仁)	0
华扬	0	切吉 C (沙珠玉)	0	切吉 E (新切吉)	4
小计	4	小计	19	小计	4
	合计				27

海南地区配置 27 台分布式调相机后，青豫直流送电 600 万千瓦时发生“2+1”闭锁故障时，新能源机组的暂态过电压最严重地区塔拉地区仿真计算结果见图 5。

由仿真结果可知：在已配置 15 台调相机基础上，对后续规划新增的 3 个汇集站(红旗#4、红旗#5 和切吉 E)，每个站内各配置 4 台分布式调相机，青豫直流发生“2+1”闭锁故障，海南地区新能源机组的暂态电压均不超 1.3 p.u.。塔拉汇集的相关新能源的机端电压十分接近 1.3 p.u.。

因此，在远景年青豫直流送电 600 万千瓦方式下，配置 27 台分布式调相机可以满足对抑制送端近区暂态过电压的要求。

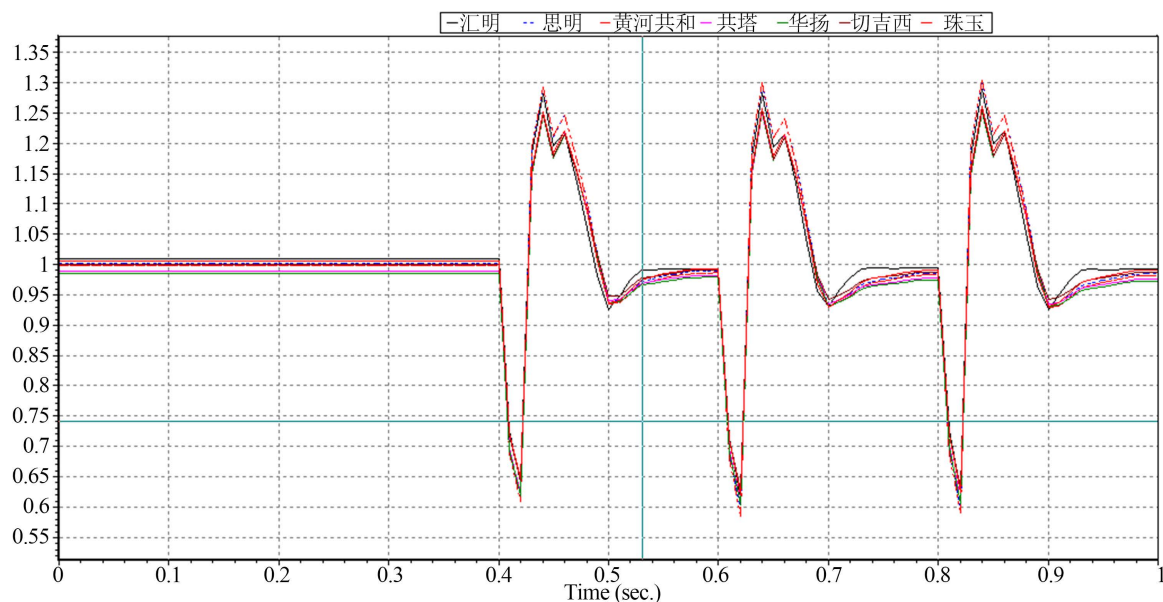


Figure 5. Tara transient overvoltage equipped with 27 distributed control cameras to send 6 million kilowatts of direct current (p.u.)

图 5. 塔拉暂态过电压配置 27 台分布式调相机直流外送 600 万千瓦(p.u.)

4.2.2. 直流送电 800 万千瓦

直流送电 800 万千瓦配置方案共计配置 27 台调相机, 考虑规划的 100 万光热投产, 青豫直流送电 800 万千瓦时发生“2+1”闭锁故障, 即可保证直流“2+1”闭锁故障后新能源机组暂态电压不超 1.3 p.u.。新能源机组的暂态过电压最严重地区塔拉地区仿真计算结果见图 6。

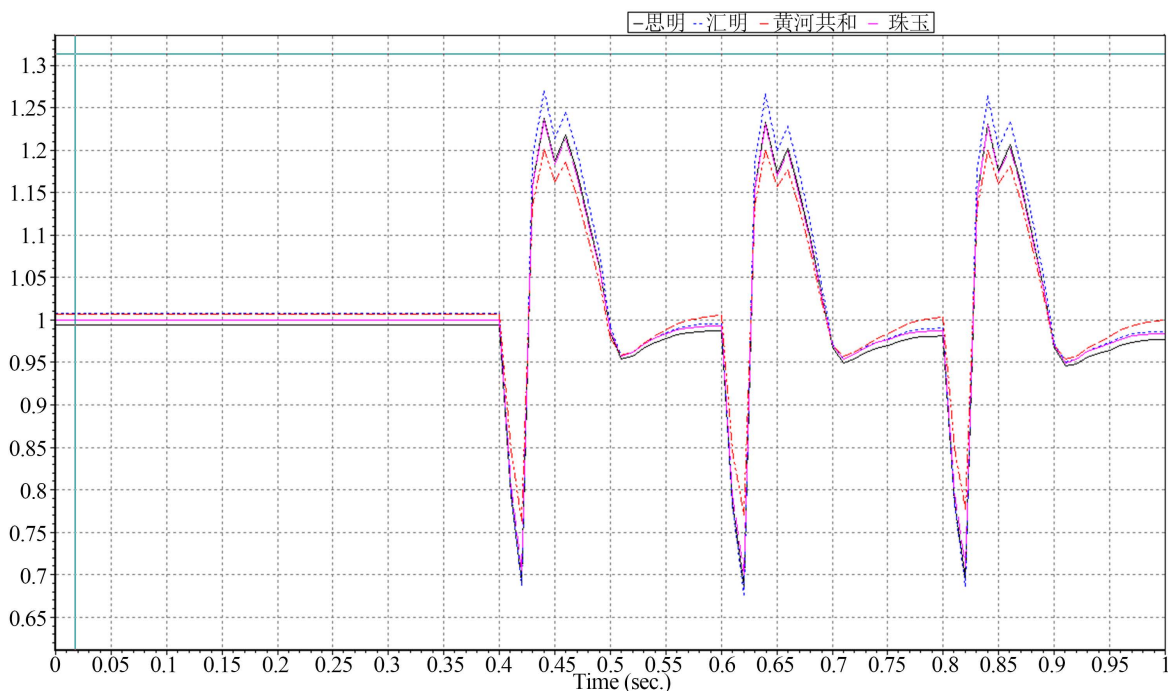


Figure 6. Tara transient overvoltage equipped with 27 distributed control cameras to send 8 million kilowatts of DC (p.u.)

图 6. 塔拉暂态过电压配置 27 台分布式调相机直流外送 800 万千瓦(p.u.)

5. 总结

大规模新能源汇集接入的直流输电送端交流系统所呈现的暂态过电压特性可能会引发新能源连锁高压脱网, 严重威胁新能源发电和送端电网的安全稳定运行。本文以青豫直流为研究对象, 首先梳理青海海南地区存在暂态电压过限的风险站点, 开展直流近区暂态过电压分布特性研究; 其次对各类无功补偿设备对送端交流系统的影响进行比较与分析, 得出最佳无功补偿方案; 最后分别对近期和远景年进行仿真计算与分析, 提出无功补偿配置方案, 保证直流的功率输送与送端电网安全稳定运行。主要结论如下:

1) 对不同类型新能源发电系统对暂态过电压的影响进行分析。当电网发生故障时, 光热发电机组具有电网电压支撑能力; 光伏发电系统容易出现反调特性, 可能进一步抬升电网过电压; 风力发电系统中, 直驱风机的暂态过电压特性与光伏发电系统类似, 而双馈风机具有一定转动惯量响应特性, 暂态响应过程较直驱机组缓慢, 调节过程较长, 同时, 能够控制调节过程中暂态过电压峰值, 避免机端过电压超过限值而脱网。

2) 对不同类型无功补偿设备对暂态过电压的影响进行分析。在系统电压发生突变时, 旋转设备调相机可根据系统电压的情况快速发出或吸收无功功率, 不呈现与电压“反调”特性, 较 SVC 和 SVG 无功电压性能较优。在青豫特高压直流送端电网配置小容量调相机是国内首次, 小容量调相机对暂态过电压的抑制和系统的安全稳定运行均有明显效益。

3) 对不同时期青豫直流无功补偿配置方案进行分析。投产初期推荐共计配置 15 台分布式调相机, 可满足在冬季日间光伏大发方式, 海南地区光大风小运行方式下, 青豫直流输电 400 万千瓦的要求; 远景年需要继续配套 12 台分布式调相机, 共计 27 台分布式调相机, 可以保证直流输电 600 万千瓦; 后续配套电源不少于 100 万光热, 且光热部署与塔拉和海南, 可以支撑直流输电 800 万千瓦。

基金项目

国家电网公司总部科技项目(5102-201956301A-0-0-00)“考虑暂态电压传播特性的高比例新能源直流外送系统调相机配置研究”。

参考文献

- [1] 汪娟娟, 张尧, 夏成军, 等. 交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 30-34.
- [2] 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.
- [3] Noroozian, M., Petersson, N.A., Thorvaldson, B., et al. (2003) Benefits of SVC and STATCOM for Electric Utility Application. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Dallas, 7-12 September 2003, 1143-1150.
- [4] Han, T., Chen, Y.B. and Ma, J. (2018) Multi-Objective Robust Dynamic VAR Planning in Power Transmission Grids for Improving Short-Term Voltage Stability under Uncertainties. *IET Generation, Transmission and Distribution*, **12**, 1929-1940. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1521>
- [5] 索之闻, 刘建琴, 蒋维勇, 李志强, 杨林. 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.
- [6] 陈宁. 光伏并网变流器关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [7] 马琳. 无变压器结构光伏并网逆变器拓扑及控制研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [8] Du, C.-S., Zhang, C.-H. and Chen, A.L. (2010) Amplitude Limiting for the Photovoltaic (PV) Grid-Connected Inverter with the Function of Active Power Filter. *2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, Hefei, 16-18 June 2010, 426-432. <https://doi.org/10.1109/PEDG.2010.5545931>
- [9] 乔颖, 陈惠粉, 鲁宗相, 等. 双馈风电场自动电压控制系统设计及应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 15-22.
- [10] 古含. 永磁直驱型风力发电系统及其并网控制[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012.

- [11] 谭勋琼, 唐估, 吴政球. 10MW 变速直驱型风力发电机组的建模及 Matlab 仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 24(8): 15-21.
- [12] 袁志昌, 刘文华, 宋强. 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.
- [13] 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.
- [14] 张潮. 多直流馈入系统动态无功优化配置研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2018.
- [15] 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.
- [16] 王强. 利用调相机降低多馈入直流换相失败风险的动态无功配置研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [17] 刘建勋, 陆榛, 付俊波, 等. 抵御直流连续换相失败的同步调相机配置研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(12): 22-27.
- [18] Tu, J.Z., Zhang, J., Bu, G.Q., *et al.* (2015) Analysis of the Sending-Side System Instability Caused by Multiple HVDC Commutation Failure. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, **4**, 37-44.
<https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2015.00051>
- [19] 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.
- [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.
- [21] 屠竞哲, 张健, 刘明松, 等. 考虑风机动态特性的大扰动暂态过电压机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 1-12.
- [22] 吕清洁, 徐政, 李晖, 肖晋宇, 王帅. 动态无功补偿对风电场暂态电压的影响及控制策略[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 122-129.
- [23] 吴亮. 大电网动态无功补偿优化配置模型与算法研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [24] Xu, Y., Dong, Z.Y., Meng, K., *et al.* (2014) Multi-Objective Dynamic VAR Planning against Short-Term Voltage Instability Using a Decomposition-Based Evolutionary Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, **29**, 2813-2822.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2310733>
- [25] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 90-95.
- [26] 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): 22-28.
- [27] 尹立敏, 雷钢, 吕莉莉, 齐敏. 基于同步调相机降低换相失败风险的仿真研究[J]. 电测与仪表期刊, 2007, 44(12): 504.