

大容量电压源型逆变器在新型电力系统构建中的关键技术和创新展望

马为民, 李明, 薛英林, 王莹鑫, 吴方劼, 赵峥, 李探
(国网经济技术研究院有限公司, 北京市 102209)

摘 要:【目的】基于模块化多电平技术的大容量电压源型逆变器(static var generator, SVG), 可实现主动构网、无功补偿、谐波抑制、阻抗重塑等多种功能, 是支撑新型电力系统构建的重要设备。【方法】对大容量电压源型逆变器在新型电力系统构建中的关键技术进行了论述。首先, 回顾了SVG的发展历程和基本拓扑原理, 梳理了SVG与模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)演化转换关系, 分析了SVG支撑电网强度的量化评估公式, 总结了SVG保障新型电力系统在高比例新能源、高比例电力电子设备接入下安全稳定运行的优势。然后, 重点对基于SVG的多源换相换流器(multisource line commutation converter, SLCC)技术、有源滤波器、构网型SVG、储能型SVG等关键技术进行了分析。最后, 对SVG在未来新型电力系统中可发挥的关键作用和后续重点研究方向进行了展望。【结果】在未来新型电力系统构建中, 大容量SVG在大规模新能源孤岛送出、弱系统电压支撑、广域谐波抑制等方面应用前景广阔。【结论】孤岛新能源下SVG预充电和黑启动、多SVG间协调配合控制等方面有待开展进一步深入研究。

关键词: 新型电力系统; 电网强度; 电压源型逆变器(SVG); 有源滤波; 多源换相换流器(SLCC)

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2025)10-0001-11

DOI: 10. 12204/j. issn. 1000-7229. 2025. 10. 001

Key Technologies and Innovation Prospects of Large-Capacity Voltage-Sourced Inverter in the Construction of New Power Systems

MA Weimin, LI Ming, XUE Yinglin, WANG Yingxin, WU Fangjie,
ZHAO Zheng, LI Tan

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

ABSTRACT: [Objective] The large-capacity static var generator (SVG) based on modular multilevel technology can be used to realize various functions such as active network construction, reactive power compensation, harmonic suppression, and impedance remodeling, and is an important equipment to support the construction of new power systems. [Methods] This study discusses the key technologies and innovation prospects of large-capacity voltage-sourced inverters in the construction of new power systems, reviews the development history and basic topological principles of SVG, determines the evolutionary conversion relationship between SVG and modular multilevel converters, analyzes the quantitative evaluation formula of AC grid strength supported by SVG, and summarizes the advantages of SVG in ensuring the safe and stable operation of the new power system with a high proportion of new energy and power electronic equipment. Then, key technologies such as SVG-based multisource line commutation converter (SLCC) technology, active filter, grid-forming SVG, and energy storage-type SVG were analyzed. Finally, the key role that SVG plays in the construction of new power systems and the key research directions were discussed. [Results] In the construction of new power systems, large-capacity SVGs have broad application prospects in areas such as large-scale new energy island exports, weak-system voltage support, and wide-area harmonic suppression. [Conclusions] Further in-depth research is needed on SVG precharging and black start, as well as on coordinated control among multiple SVGs in isolated new energy systems.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5100-202356816A-3-8-KJ).

KEYWORDS: new power system; grid strength; static var generator (VSG); active filtering; multisource line commutation converter (SLCC)

0 引言

2021年3月15日,中央财经委员会第九次会议首次提出构建以新能源为主体的新型电力系统^[1-3]。在2023年1月6日国家能源局发布的《新型电力系统发展蓝皮书(征求意见稿)》中明确:新型电力系统具备安全高效、清洁低碳、柔性灵活、智慧融合四大重要特征^[4-5]。作为新型能源体系的重要组成和实现“双碳”目标的关键载体,在新型电力系统中,传统发电设备的占比减少,风电、光伏等新能源呈间歇性强、新能源富集地区与负荷集中地区逆向分布特征^[6],需要远距离大规模传输电力,系统稳定问题突出^[7-8]。新型电力系统“双高”(高比例电力电子、高比例新能源)特征明显,将导致转动惯量低、电压支撑能力减弱,且谐波、振荡问题突出,再加上新能源的随机性、波动性等,对电力系统的安全稳定运行不利^[9-10]。本质上,新型电力系统稳定运行就是维持长时间尺度内有功功率和无功功率的平衡。因此,新型电力系统构建需要解决以下五方面问题:增强电压支撑(实现电压构建)、抑制宽频振荡、提高电能质量、提升系统惯量、平抑功率波动。

目前解决上述问题的主要技术手段是采用无源滤波器、静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和调相机^[12-14]。基于无源滤波器的电能质量控制及电压支撑手段应用比较广泛,这些设备成本较低、技术简单,在换流站和低压配电领域常见,但调谐点一经确定难以改变,响应速度慢,低电压过程容性无功输出能力较弱。SVC成本低、反应迅速,早期工程应用较多,但运行时会产生大量谐波电流,且控制延时长,低电压过程容性无功输出能力较弱。调相机具有暂态支撑能力强、过流倍数高等优点,但是响应速度受限、造价高、运维成本大,且不具备谐波抑制等功能。

上述问题可通过充分利用储能电池、电压源型高压直流输电以及电力电子器件的快速可控特征应对。相较于传统设备,这些新手段具有响应速度快、吸收无功连续、谐波电流小、损耗小、噪声小等诸多优势,是满足新型电力系统构建的重要设备,其中大容量电压源型逆变器将发挥重要作用^[15-20]。

大容量电压源型逆变器(static var generator, SVG)作为未来新型电力系统构建的重要组成部分,其作用将不仅仅限于最传统的无功补偿,还可实现

有源滤波、电网有功/无功主动支撑,并与直流输电、新能源场站等相互协同配合^[21-24]。闽粤联网工程首次实现SVG有源滤波功能的工程应用,依靠SVG输出多频次谐波电压实现与交流滤波器同等的谐波抑制能力,并同时具备了较强的无功快速支撑能力,大幅降低了交流滤波器场占地,提升了工程灵活可控能力与经济效益^[25]。在与直流输电系统协同配合方面,文献[26]提出的基于SVG的多源换相换流器(multi source line commutation converter, SLCC)直流输电技术,是一种结合柔性直流和常规直流特点的输电技术,通过传统直流工程换流变阀侧并联配置SVG,使之呈现电压源特性,可灵活调节动态无功,降低换相失败风险,减少对系统依赖。此外,SVG与常规直流相互配合,可快速调节送受端系统交流电压,解决特高压直流输电工程中送端过电压问题,并降低受端换相失败风险。文献[27]对比了调相机、SVG等不同无功补偿方案对新能源经特高压直流输电系统的影响。文献[28]提出了一种基于SVG的送端采用二极管整流器、受端采用晶闸管的不控整流单向输电拓扑,配置的大容量SVG能够主动调节送端出力,实现送受端有功平衡和送端风场主动构网。除此之外,通过在SVG子模块中增加储能电池以及相应的电力电子开关能够使SVG具备储能功能,实现送端新能源系统出力峰谷调节和紧急情况下交流电网有功、无功的主动支撑^[29]。大容量电压源型逆变器因其诸多技术优势,在新型电力系统构建中将逐渐得到青睐,然而目前较少文献系统梳理其功能作用和研究现状,亟需进一步厘清其运行机理、分析现阶段攻关技术,指明其在未来新型电力系统构建中的创新发展方向。

本文对大容量电压源型逆变器在新型电力系统构建中的关键技术总结和展望,首先,总结其基本结构、拓扑变化情况以及基本运行机理;其次,描绘其应用场景,从新型电力系统构建需求角度分析大容量电压源型逆变器的发展方向;然后,从有源滤波器、SLCC、构网型SVG、储能耗能型SVG角度介绍目前的关键技术;最后,进行总结。

1 SVG发展概况与拓扑演变

1.1 SVG发展历程

早期交流系统中,SVG主要起无功补偿作用,在20世纪70年代就已出现并投入商业使用;随着

半导体器件发展,SVG 运行特性得到显著优化,容量大大提升,获得了广泛应用^[30]。SVG 相较传统无功补偿设备直流侧储能元件更小,具有更小的装置尺寸、更快的响应速度和经济性,根据储能元件为电容或电感,SVG 可分为电流型 SVG 和电压型 SVG,其中电压型 SVG 具备更好的经济性且更为安全可靠,获得了更为广泛的应用^[31]。在此基础上,为进一步适应高电压、大容量的应用场景,多电平 SVG 应运而生,包括箝位二极管型、电容悬浮型和级联 H 桥型(亦称链式 SVG)等。其中,链式 SVG 采用模块化多电平技术,典型结构为三相星型或角型静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM),其开关频率较低、损耗较小,更便于进行扩展拆装。

大容量 SVG 的发展与器件和拓扑技术升级密切相关。1972 年,日本学者提出将强迫换相的晶闸管桥式电路作为调相装置;1976 年,美国学者 L. Gyugyi 提出用换流器进行无功补偿,限于器件水平未能实现;1980 年,日本三菱公司研制出 20 MVA 采用强迫换相晶闸管桥式电路的 SVG 并实现并网运行^[32]。随着半导体器件的发展,SVG 的运行特性得到显著优化,1987 年,美国国家电力研究院与西屋公司研发了采用可关断晶闸管(gate turn-off thyristor, GTO)的 SVG^[33];1991 年,用于商业运行的第一套 ± 90 Mvar 的 SVG 装置在日本投入使用;1994 年,美国基于 GTO 晶闸管研制了 100 MVA 的 SVG 装置;1997 年,由

西门子公司研制的 ± 8 Mvar 的 SVG 在丹麦 Rejsby Hede 风场正式投入运行^[34];1999 年,ALSTOM 与 NGE 企业共同研制出了容量为 ± 75 Mvar 的链式多电平 SVG,并在英国 Ease Clayton 变电站投运^[35];2003 年,三菱公司研制出一套容量为 ± 100 Mvar 的 SVG,在美国国家电网投入运行。我国对 SVG 的研制起步虽晚但发展迅速,1999 年,清华大学与国网河南省电力公司开发出一套容量为 ± 20 Mvar 的 SVG 并在河南朝阳变电站中投运;2001 年,一套 ± 500 kvar 的 SVG 研制成功并投入运行;2006 年,国网上海电力公司、清华大学和许继集团共同研制出一套 ± 500 Mvar 的链式 SVG,成为世界上第一次利用链式+IGCT 的逆变器结构^[36-37]。随着模块化多电平技术的发展,基于链式级联子模块的 STATCOM 已成为高压大容量 SVG 发展的一种主流技术。

1.2 以三相链式 SVG 为基本单元的拓扑演变

三相 STATCOM,也称为链式 SVG,每相由大量全桥子模块级联构成。图 1 给出了链式星型接线 SVG 与模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑演化转换关系,如果 2 台 SVG 中心点构成正负直流端子,则 2 台 SVG 组合就可以等效转换为基于全桥子模块的 MMC,当 MMC 无需直流电压极性翻转时,则拓扑可进一步简化为基于半桥子模块的 MMC,即目前最主流的 MMC 拓扑结构。从这个角度看,基于半桥子模块的 MMC 拓扑事实上属于广义范畴内的大容量链式 SVG。

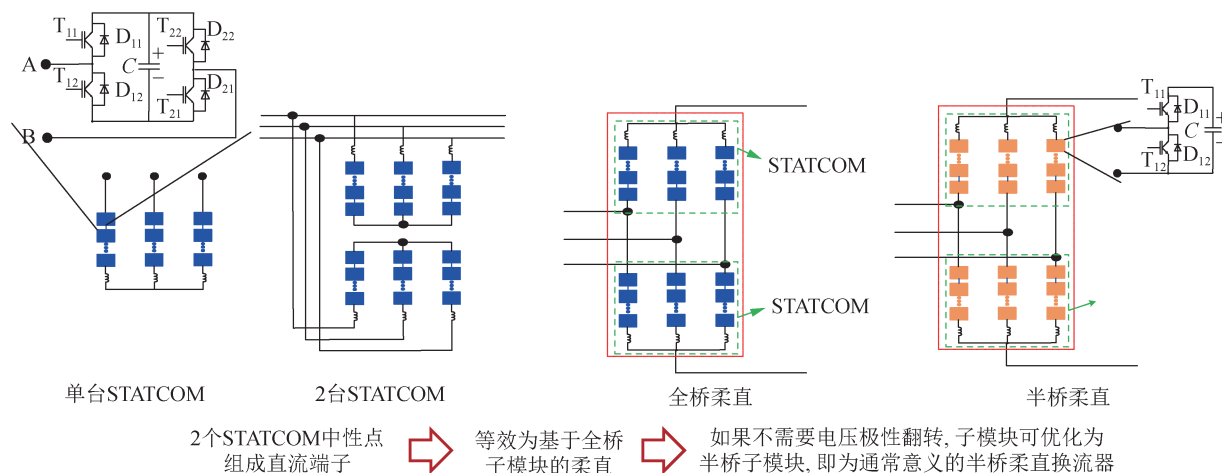


图 1 SVG 与 MMC 拓扑演化关系

Fig. 1 Evolution relationship between SVG and MMC topology

1.3 SVG 对系统强度支撑分析

在新型电力系统构建过程中,以 SVG 为基本单元的电力电子设备将逐步增加,因此在分析电力系统强度时,需要计及 SVG 的影响。

传统电力系统中通常用短路电流或短路比

(short circuit ratio, SCR)来评价系统的强度,短路比本质上反映的是有功电流在系统阻抗上产生电压波动的大小,减小电压波动可提升短路比,增加系统强度。在没有 SVG 补偿的情况下,当有功功率上升时增大的有功电流会加大系统阻抗消耗的无功,使换

流站从系统吸收无功功率,导致换流阀交流侧电压 U_1 下降,由于 U_1 下降,有功电流会进一步上升,使 U_1 进一步下降,导致系统失稳。在有 SVG 补偿的情况下,如果始终保持换流站无功功率结零,当有功功率上升时,功角有上升趋势, $\cos\delta$ 下降,这种趋势会使 U_1 上升,在有功不变的情况下, U_1 的上升会抵消功角的上升,从而建立一个新的平衡,示意如图 2 所示。综上,SVG 通过补偿有功功率在系统阻抗上产生的无功功率提升了系统强度。

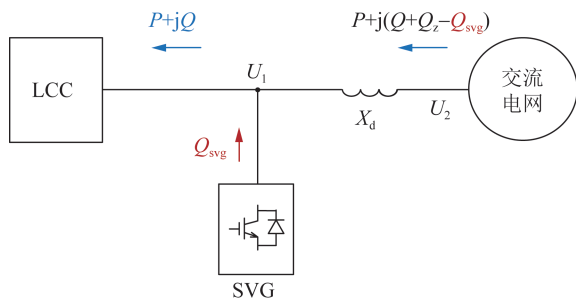


图 2 SVG 接入后 LCC 系统功率潮流

Fig. 2 Power flow of the LCC system after SVG is connected

根据这一原理,如果利用 SVG 及时补偿有功输电时通道上的无功消耗,使其为 $Q_z - Q_{svg}$,就可增加系统强度。当系统中配置 SVG 后,可用综合短路比表征系统强度:

$$\sigma'_{SCR} = \frac{P}{Q_z - Q_{svg}} \quad (1)$$

式中: P 为 LCC 传输有功功率; Q_z 为线路上的无功损耗; Q_{svg} 为 SVG 发出的无功功率。

SVG 对系统强度的加强是通过提升系统电压减小有功电流,从而减小有功电流在系统阻抗上产生的无功功率实现的(有功功率恒定)。式(1)可等效为:

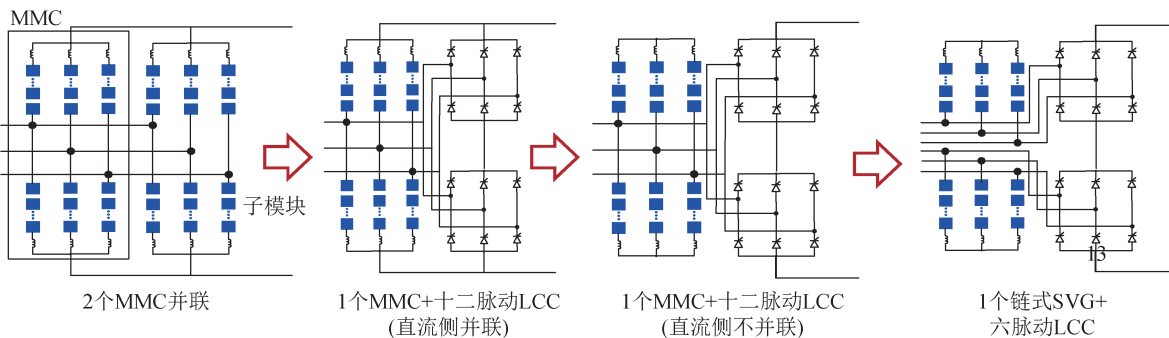


图 3 SLCC 拓扑演变过程

Fig. 3 SLCC topology evolution

SLCC 基本换流单元由六脉动 LCC 和三相链式 SVG(相当于 MMC 阀的一半)构成,结构示意和等效电路如图 4 所示。其中,LCC 承担有功功率的传输,SVG 兼顾谐波滤除和无功补偿功能,可完全替代交流

$$\sigma'_{SCR} = \frac{S + 2Q_{svg}}{P} \quad (2)$$

式中: S 为 LCC 传输的功率。

2 大容量 SVG 的应用场景和关键技术

2.1 多源换相换流技术

以电网换相换流器(line commutated converter, LCC)为核心的传统直流输电是现阶段大规模电力远距离传输的主要技术手段,传统直流基于交流滤波器/并联电容器来补偿无功,多回直流入面面临同时换相失败的风险。在大规模新能源外送场景下,传统直流存在送端弱系统无功盈余过电压、无法主动构网实现孤岛运行等问题。以电压源换流器(voltage sourced converter, VSC)为核心的柔性直流输电技术应用发展迅速,在深远海风电送出、异步电网柔性互联等方面应用广泛,但面对大规模新能源外送的需求,其传输容量小、故障穿越困难、振荡风险高、设备投资大、占地面积大等问题越来越突出。而晶闸管通流容量大,同等容量 LCC 换流阀成本远低于 VSC 换流阀,传统直流输电技术具备较大的经济优势。

为此,文献[27]提出了 SVG 与晶闸管换流阀结合的多源换相 SLCC 输电技术,将常规直流和柔性直流技术的优势有效融合,在直流工程换流变阀侧增加大容量 SVG,通过较少的换流阀成本实现与 VSC 一致的系统特性,具备较好的经济性。该技术计划在江苏扬州二期工程进行应用示范,其拓扑结构演化示意如图 3 所示。其拓扑演化过程为:2 个 MMC 并联(大容量)→MMC 与十二脉动 LCC 并联→LCC 承担有功,MMC 承担无功,直流侧可不连接→半个 MMC 与六脉动 LCC。

滤波器/并联电容器组。

由图 4 可知,SLCC 系统换流电路由换流变支路与 SVG 支路(MMC 支路)并联后接入晶闸管换流阀,其等效换流电路与常规直流相同,换相机制

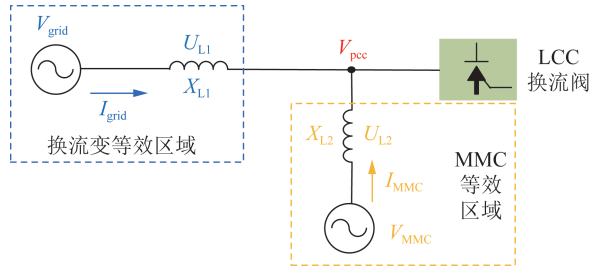


图 4 SLCC 系统等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of SLCC system

一致,工作原理成熟,其等效阻抗 X_{Leq} 、等效电源 $\dot{V}_{eq}$ 为:

$$X_{Leq} = \frac{X_{L1}X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}} \quad (3)$$

$$\dot{V}_{eq} = \frac{\dot{V}_{grid}X_{L2} + \dot{V}_{svg}X_{L1}}{X_{L1} + X_{L2}} \quad (4)$$

式中: X_{L1} 、 X_{L2} 分别为交流电网等值电抗和SVG支路电抗; V_{grid} 和 V_{svg} 分别为交流电网和SVG支路电压; V_{eq} 为SLCC系统的换相电压,即交流电网和SVG支路合成后等效换相电压。

由式(3)可知,SLCC系统换相阻抗由换流变阻抗与SVG支路(MMC支路)阻抗并联构成,阻抗值小于LCC系统换相阻抗,减小了感性压降,加速了换相过程,所需的无功功率也相应减小。由式(4)可知,SLCC系统换相电压由交流电网电压和SVG支路(MMC支路)电压合成提供,动态过程中能提供更稳定的换相电压,换相失败风险降低。

SLCC对由受端换相失败故障引起的送端过电压也能够起到显著抑制作用^[38]。在系统受端换流阀发生“5次连续换相失败+闭锁”性故障时,LCC送端交流过电压接近1.45 p. u.,超过了交流过电压Ⅰ段保护定值1.3 p. u.;而SLCC在SVG阀的作用下交流过电压小于1.2 p. u.,有效避免了交流过电压保护动作。LCC和SVG过电压仿真波形对比如图5所示。

此外,SLCC对换相失败有着明显的抑制作用。表1统计了交流系统单相接地故障下换相失败的108个算例,由于并联的SVG支路可以提供较强的交流电压支撑能力,LCC、SLCC换相失败的临界电压分别为0.8、0.6 p. u.,SLCC具有更好的故障电压响应特性。并且,从换相失败发生概率来说,表1中SLCC发生换相失败的算例个数较LCC少11%,系统可靠性更高。

SLCC配置的SVG具备滤波功能,可减少换流变45%~80%的谐波电流,改善系统运行条件,降低故障风险,如图6所示。

SLCC可以孤岛输送新能源,SVG确定送端电网电压幅值与频率,LCC平衡新能源送出系统功率,如图7所示。图7中仿真条件为:风电孤岛装机4000 MW;

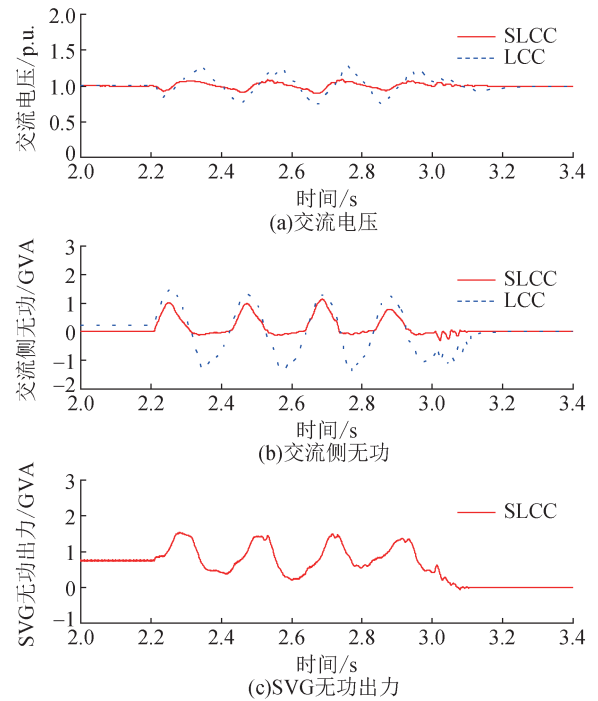


图 5 受端换相失败过程中送端过电压及无功响应特性

Fig. 5 Characteristics of over-voltage and reactive power response at the sending end during commutation failure at the receiving end

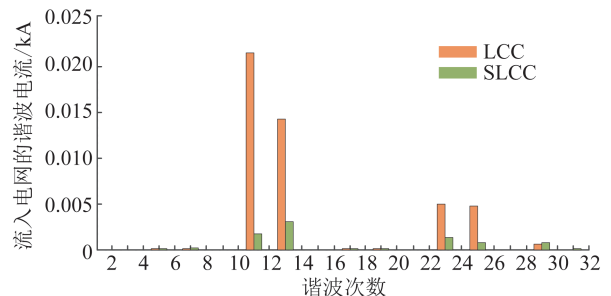


图 6 稳态运行时谐波电流分布情况

Fig. 6 Harmonic current during steady-state operation

交流系统电压为750 kV;短路阻抗为138.2 Ω ;单极直流系统,直流电压为800 kV,额定功率为4000 MW。

2.2 构网型或储能型SVG及与新能源场站组合技术

电网运行构建的根本任务就是建立包括基准电压在内的节点电压系统,并在不同时间尺度上维持节点有功功率和无功功率的平衡。大容量构网型SVG可参与构建系统电压幅值或频率,在暂稳态期间主动提供惯量或无功支撑。稳态运行时,构网型SVG提供无功补偿,调节电压幅值,改善系统潮流分布;在交流系统故障瞬间,构网型SVG维持端口电压不变,与系统电压形成幅值差,快速向系统注入无功电流,实现电压支撑,调相机的特性与之类似。因具备无功输出特性好、动作响应速度快、工作损耗少等特点,构网型SVG在弱交流系统、新能源并网方面具有

表 1 交流系统单相故障换相失败统计
Table 1 Statistics of single-phase faults and commutation failures in the AC system

相角/(°)	LCC						SLCC					
	0.4 p.u.	0.5 p.u.	0.6 p.u.	0.7 p.u.	0.8 p.u.	0.9 p.u.	0.4 p.u.	0.5 p.u.	0.6 p.u.	0.7 p.u.	0.8 p.u.	0.9 p.u.
0	2	2	1	1	1	1	2	2	1	0	0	0
20	2	2	2	2	0	1	2	2	1	0	0	0
40	2	2	1	1	1	0	2	2	1	0	0	0
60	2	2	1	1	1	1	2	2	1	0	0	0
80	2	2	2	2	1	1	2	2	2	0	0	0
100	2	2	2	1	1	0	2	2	1	0	0	0
120	2	2	1	1	1	1	2	2	1	0	0	0
140	2	2	2	2	1	1	2	2	1	0	0	0
160	2	2	1	1	1	0	2	2	1	0	0	0
180	2	2	1	1	1	1	2	2	1	0	0	0
200	2	2	2	2	0	1	2	2	2	0	0	0
220	2	2	1	1	1	0	2	2	1	0	0	0
240	2	2	1	1	1	1	2	2	1	0	0	0
260	2	2	2	2	1	1	2	2	1	0	0	0
280	2	2	2	1	1	0	2	2	1	0	0	0
300	2	2	1	1	1	1	2	2	1	0	0	0
320	2	2	2	2	1	1	2	2	2	0	0	0
340	2	2	1	1	1	0	2	2	1	0	0	0

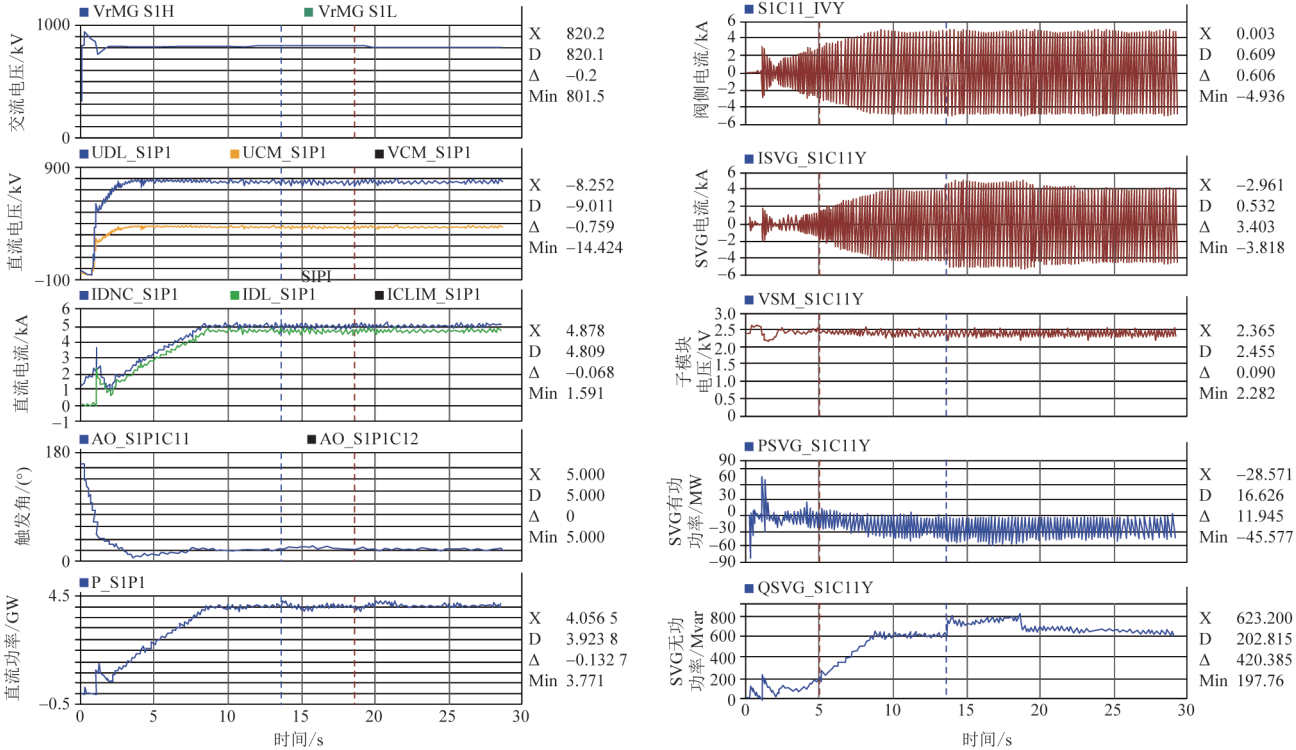


图 7 SLCC 孤岛输送新能源仿真示意
Fig. 7 Simulation diagram of SLCC island transportation of new energy

显著优势,可用于风电场/光伏电站出口侧,以调节电网功率因数、抑制公共连接点不平衡电压和新能源

电站低电压穿越能力。
西部沙戈荒地区新能源呈广域分布特点,部分

新能源场站位于电网末端,系统强度极低,易发生功角失稳或电压失稳,使新能源机组难以稳定运行。目前破解新能源基地孤岛消纳难题的一种解决方案是通过将新能源机组(典型如风电机组)的控制策略进行改造,使新能源机组具备构网特性,然后通过传统直流或者二极管不控整流直流输送,具有造价低、经济性高等优点,但是单台风机容量小,数量庞大,构网型风机间协调控制难度较大。

将大容量 SVG 分别布置在新能源场站能够有效提升电压稳定性,增强新能源机组的稳定运行能力,结合新能源场站进行分散式布置的 SVG 拓扑如图 8 所示。对 SVG 进行无功电压构网型控制改造能够对电网末端经长距离输电线路汇集的新能源场站起到电压支撑作用,目前无功-电压构网型控制包括定交流电压幅值控制、 $V-Q$ 斜率控制与虚拟励磁控制 3 类^[39-40]。这类分散式 SVG 协同直流输电系统是实现大规模新能源孤岛送出的一种解决方案,不过多新能源场站 SVG 之间需要协调控制参数来满足系统无功-电压的合理分布需求。此外,考虑到 LCC 有功调节过程在百毫秒级别,调节速度较慢,需要配合耗能装置进行功率盈余下的电压控制。

对于海上风电送出场景,本文提出可采用如下分片分区风场配置大容量构网型 SVG 的方案,如图 9 所示。SVG 配置在升压站上,海上换流站采用晶闸管换流阀或二极管换流阀,陆上站可以采用晶闸管换流阀或模块化多电平换流阀。大容量 SVG 与二极管换流阀-MMC 配合能够实现送端孤岛系统黑启动,同时通过主动调节送端交流电压以满足有功快速调节和功率平衡需求。

此外,针对大规模新能源孤岛经直流远距离外

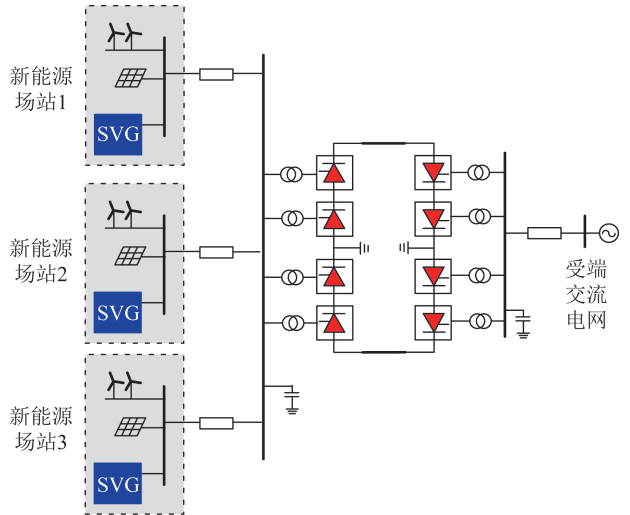


图 8 新能源场站进行分散式布置的 SVG 拓扑

Fig. 8 Distributed SVG topology for renewable energy stations

送场景,具备储能、耗能功能的大容量 SVG 能够实现稳态运行时的削峰填谷功能以及故障过程中的盈余功率消耗,对于远海风电并网工程与沙戈荒地区大规模新能源汇集送出工程的系统构建尤为适用。储能型 SVG 拓扑如图 10 所示,有 2 种基本类型:1)2 个星型 SVG 中性点连接储能电池;2)储能电池直接嵌入子模块。通过灵活控制子模块电容与储能电池功率交换,从而满足储能与耗能功能。储能型 SVG 分布于各新能源场站交流母线,采用构网型控制方法调节有功输出及系统频率。

针对大规模新能源场站孤岛经二极管整流模块化多电平换流器(diode rectifier unit-modular multilevel converter, DRU-MMC)送出场景,由于二极管系统不具备功率调节能力,构网型 SVG 直接调节交流电压以满足功率外送需求。适用于大规模新能

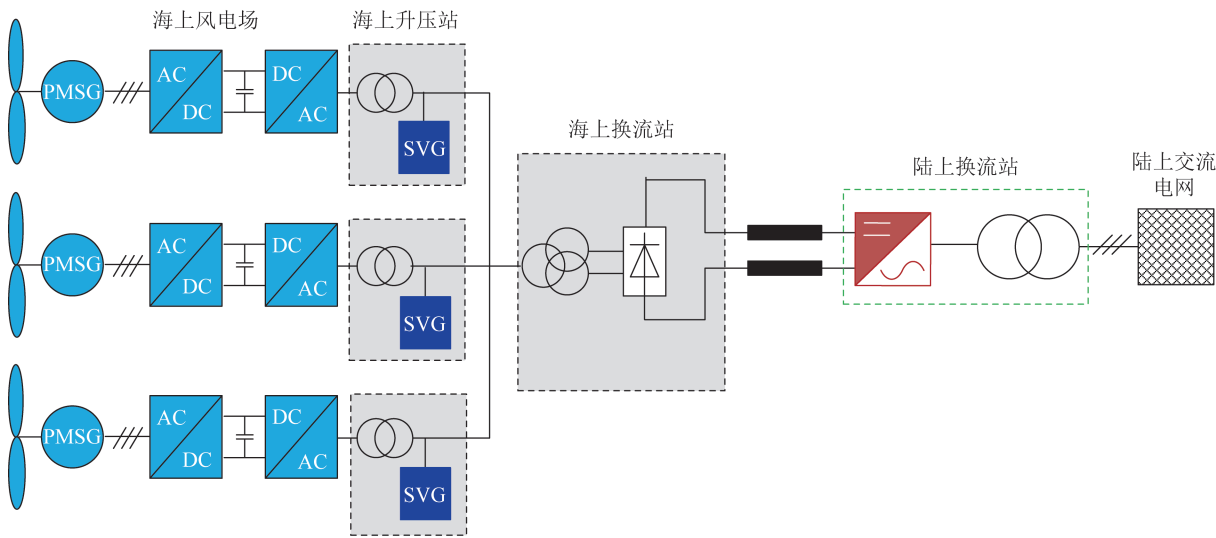


图 9 大容量构网型 SVG 配置方案

Fig. 9 Configuration scheme of large-capacity grid-forming SVG

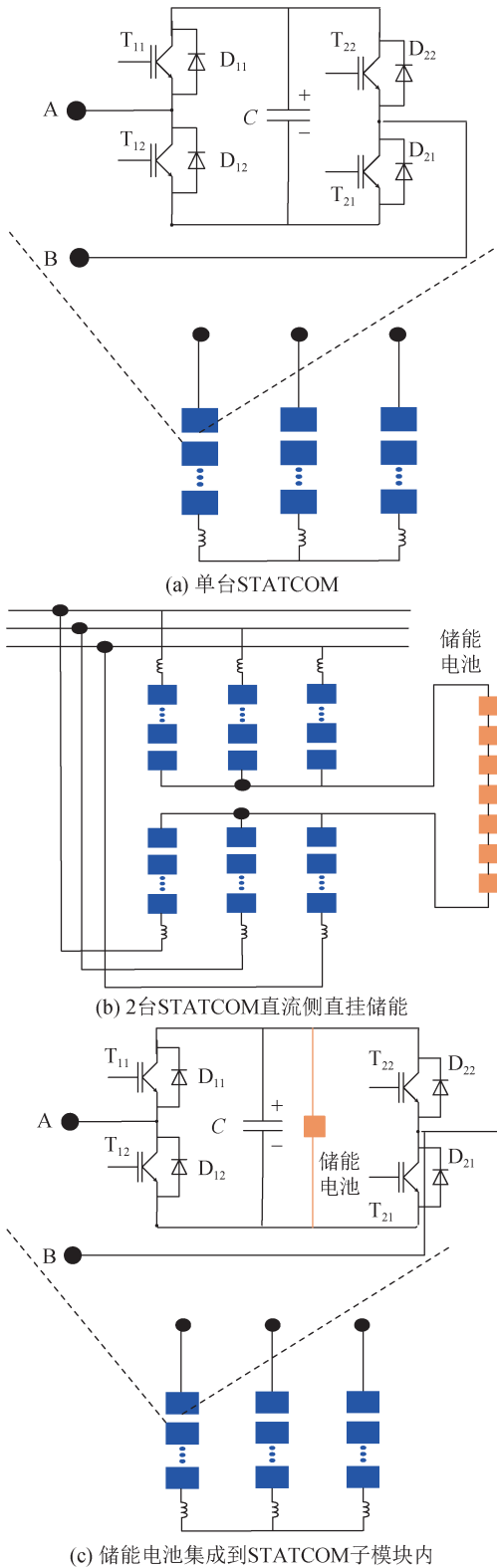


图 10 储能型 SVG 拓扑
Fig. 10 Energy storage SVG topology

源孤岛经 DRU-MMC 送出场场景的储能型 SVG 控制方法如图 11 所示,其中有功功率与交流电压正相关,无功功率与交流系统频率正相关。

2.3 有源滤波器

作为电源型逆变装置,SVG 也具备补偿系统谐波

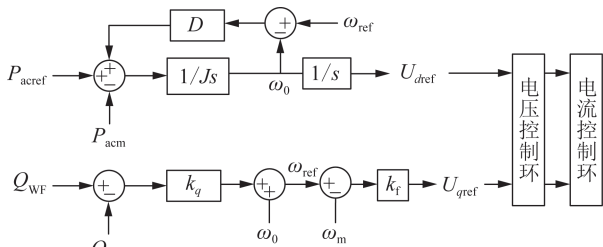


图 11 储能型 SVG 控制
Fig. 11 Energy storage SVG control

的能力^[41-42]。有源滤波器通过监测接入节点电压/负载电流获取补偿对象的谐波分量,并将其分量反相作为补偿电流的指令信号,使其发出与负载电流谐波分量大小相等、方向相反的补偿电流,抵消谐波分量^[43]。由于其仅对控制指令值进行调整,无需大容量电抗器、电容器等储能元件或额外的滤波装置,具有较高的经济效益。高压有源电力滤波器(high voltage active power filter, HVAPF)在传统 SVG 的基础上增加了谐波补偿环节,可有效结合无功补偿和谐波补偿的能力,实现谐波抑制和动态无功输出,实现更快速、更灵活、更安全的电网电压支撑,谐波电压及谐波治理等功能,保障系统安全稳定运行^[44]。

SVG 通过与无源滤波器协调运行可有效抑制负载产生的 13 次以下谐波电流,改善电网电压畸变率。闽粤背靠背直流工程广东侧的滤波装置采用了升压式有源滤波器 SVG,该工程旨在实现国家电网、南方电网互联互通,提升网间、省间功率互济能力,其中广东侧交流系统短路容量较小,无源滤波器无法抑制对侧换流站呈容性时引起的谐波电流放大,更不能有效滤除传统 12 脉动可控整流为交流侧引入的 $12n\pm1$ 次特征谐波。此外,传统设计方法需要为换流阀组正常运行配置无功容量,通常设置为总输送容量的 50%~60%,成本较高,且同样容易为系统引入谐波放大风险。

闽粤工程通过 2 台 SVG 配合实现谐波补偿和小功率下无功补偿解决了上述问题,如图 12 所示。其中,一台 SVG 承担直流运行时无功调节功能,具有无功控制和电压控制 2 种控制模式;另一台 SVG 承担滤波功能和小功率的无功调节功能。上述设计使 SVG 同时具备了支撑系统电压和滤除低频谐波的能力,与无源滤波装置相比,其接入不仅能够有效减少换流站和交流系统的无功交换,且降低了无源滤波器投切时的无功波动。

此外,SVG 可以通过优化控制器参数控制阻抗频率特性,可调节系统宽频广域阻抗特性,有效降低高比例电力电子化系统振荡风险。

3 结 论

本文从拓扑结构、控制策略、应用场景 3 个方面

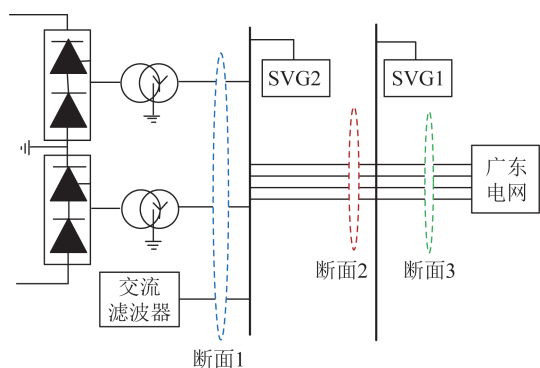


图 12 广东侧 SVG 配置

Fig. 12 Guangdong side SVG

对大容量 SVG 在主动构网、无功补偿、谐波抑制、阻抗重塑方面的功能进行了论述,并重点对 SLCC 及其与新能源场站组合等 SVG 应用形式进行了介绍,所得主要结论如下:

从拓扑结构上看,SVG 主要有 3 类演变:一是子模块内部拓扑变化,例如 SVG 与储能电池结合,形成储能型 SVG;二是同类 SVG 组合,例如 2 台 SVG 交流侧并联、直流侧共用直流端口,形成柔直典型换流器拓扑-MMC;三是 SVG 与其他换流器或设备组合,如与晶闸管换流阀结合形成 SLCC,与二极管换流阀结合形成构网型二极管换流器,与无源电容器结合形成混合式有源滤波器。

从控制策略上看,SVG 可兼具如下 4 类功能:1) 无功补偿,保证稳态、暂态下系统交互无功功率平衡,提供电压支撑;2) 构网控制,确定电网电压和频率,有效提升系统惯量,如果为储能型 SVG 则可以实现盈余功率平衡;3) 有源滤波,滤除特定次谐波,控制电能质量;4) 阻抗重塑,改善系统回路阻抗频率特性,实现宽频振荡抑制。

从应用场景上看,大容量 SVG 在未来新型电力系统构建中应用前景广阔,有 3 类典型场景:1) 大规模新能源孤岛送出,如沙戈荒新能源基地外送、大规模远海风电并网消纳;2) 弱系统电压支撑或无源系统主动构网,如偏远地区矿业负荷供电、长线路输电能力提升;3) 广域电力电子系统谐波抑制,如多电力电子设备的电网谐波劣化抑制。

未来需要着重在孤岛新能源下 SVG 预充电和黑启动、多 SVG 间协调配合控制、SVG 与直流协同配合时 SVG 配置容量的量化评估分析、SVG 构网控制策略深化等方面开展深入研究。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

马为民、李明、薛英林进行了文章结构梳理;王

莹鑫、吴方劼、赵峥、李探完成文章内容和素材整理。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

4 参考文献

- [1] 马晓伟,王文倬,薛晨,等. 西北新型电力系统先行示范体系探究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 1-7.
MA Xiaowei, WANG Wenzhuo, XUE Chen, et al. Research on the leading demonstration system of new-type power system in northwest China [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 1-7.
- [2] 舒印彪,陈国平,贺静波,等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [3] 尚勇,王喆,严欢,等. “双碳”背景下陕西新型电力系统研究探索[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 20-27.
SHANG Yong, WANG Zhe, YAN Huan, et al. Research exploration of Shaanxi new type power system in the background of “dual carbon” [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 20-27.
- [4] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [5] 《新型电力系统发展蓝皮书》编写组. 新型电力系统发展蓝皮书 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [6] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [7] 马宁宁,谢小荣,亢朋朋,等. 高比例风电并网系统次同步振荡的广域监测与分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 65-74, 398.
MA Ningning, XIE Xiaorong, KANG Pengpeng, et al. Wide-area monitoring and analysis of subsynchronous oscillation in power systems with high-penetration of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 65-74, 398.
- [8] 郭贤珊,刘泽洪,李云丰,等. 柔性直流输电系统高频振荡特性分析及抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 19-29, 370.
GUO Xianshan, LIU Zehong, LI Yunfeng, et al. Characteristic analysis of high-frequency resonance of flexible high voltage direct current and research on its damping control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 19-29, 370.
- [9] 杜文娟,郝向坤,陈珏. 光伏场经柔直并网振荡稳定性分析与抑制方法研究[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 2-11, 51.
DU Wenjuan, HAO Xiangkun, CHEN Jue. Oscillation stability analysis and mitigation method of photovoltaic field connected to the grid via VSC-HVDC [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 2-11, 51.

- 2024, 43(3): 2-11, 51.
- [10] 高本锋, 符章棋, 王刚, 等. 适用于次同步振荡分析的直驱风电场平衡降阶方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 112-120.
GAO Benfeng, FU Zhangqi, WANG Gang, et al. Balanced reduction method of direct-drive wind farm for subsynchronous oscillation analysis [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 112-120.
- [11] 李世春, 宋秋爽, 薛臻瑶, 等. 含风电虚拟惯性响应的新能源电力系统惯量估计[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 84-93.
LI Shichun, SONG Qiushuang, XUE Zhenyao, et al. Inertia estimation of new energy power system with virtual inertia response of wind power [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 84-93.
- [12] 杨建明, 马云龙, 卢宇, 等. 龙政直流工程交流滤波器过负荷保护的标准化改造[J]. 浙江电力, 2023, 42(1): 23-30.
YANG Jianming, MA Yunlong, LU Yu, et al. Standardized retrofit of AC filter overload protection in Longquan-Zhengping HVDC transmission project [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(1): 23-30.
- [13] 肖洋, 李志强, 程林, 等. 西北电网集中式调相机AVC综合协调控制策略[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 270-279.
XIAO Yang, LI Zhiqiang, CHENG Lin, et al. AVC comprehensive coordinated control strategy of centralized condenser in northwest power grid [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 270-279.
- [14] 张起瑞, 辛超山, 李凤婷, 等. 多直流协调的新能源送端地区暂态过电压抑制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 98-106.
ZHANG Qirui, XIN Chaoshan, LI Fengting, et al. Multi DC coordinated transient overvoltage suppression strategy for high proportion new energy sending terminal area [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 98-106.
- [15] 马为民, 蒲莹, 宫勋. 适应高比例新能源电源外送的特高压直流控制器[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1262-1268.
MA Weimin, PU Ying, GONG Xun. UHVDC current controller for high proportional new energy transmission [J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1262-1268.
- [16] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [17] 辛保安, 单葆国, 李琰慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3126.
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3126.
- [18] 刘泽洪, 马为民, 王绍武, 等. 混合级联特高压直流输电系统方案设计及动模试验验证[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1214-1222.
LIU Zehong, MA Weimin, WANG Shaowu, et al. Schematic design of hybrid cascaded ultra HVDC and its modification in dynamic model experiment [J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1214-1222.
- [19] 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.
- [20] 何国庆, 王伟胜, 刘纯, 等. 风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(一): 送端风电机组暂态无功电压建模[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4391-4405.
HE Guoqing, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Commutation failure of UHVDC system for wind farm integration (part I): transient reactive power and voltage modeling of wind powers in sending terminal grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4391-4405.
- [21] 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.
- [22] 陈中. 级联H桥储能变换器及其控制技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
CHEN Zhong. Research on cascaded H-bridge converter for energy storage and its control techniques [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [23] 张健文, 孙人成, 周剑桥, 等. 多中压交流端口链式电池储能功率变换系统[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 8972-8984.
ZHANG Jianwen, SUN Rencheng, ZHOU Jianqiao, et al. A novel energy storage power conversion system based on multiple medium voltage AC-ports cascaded H-bridge converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8972-8984.
- [24] 杨滢, 杨晓雷, 项中明, 等. 参与一次调频储能型风电场的交流外送振荡特性分析[J]. 智慧电力, 2023, 51(9): 105-112.
YANG Ying, YANG Xiaolei, XIANG Zhongming, et al. Oscillation characteristic analysis of wind farm with energy storage participating primary frequency control [J]. Smart Power, 2023, 51(9): 105-112.
- [25] 陈明泉. 闽粤联网工程有源滤波器设计方案及其二次控保系统研究[J]. 电气技术, 2022, 23(8): 95-102.
CHEN Mingquan. Research on active power filter design scheme and secondary control-protection system of the Fujian-Guangdong interconnection project [J]. Electrical Engineering, 2022, 23(8): 95-102.
- [26] 马为民, 王玲, 李明, 等. 新型电力系统中的特高压直流输电SLCC换流技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4941-4948.
MA Weimin, WANG Ling, LI Ming, et al. SLCC converter technology of UHVDC transmission in new power system [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4941-4948.
- [27] 李志强, 何凤军, 郭强, 等. 青南新能源集中送出地区动态无功补偿方案对比研究[J]. 现代电力, 2021, 38(1): 87-93.
LI Zhiqiang, HE Fengjun, GUO Qiang, et al. Comparative study

- on dynamic reactive power compensation scheme in the concentrated delivery area of new energy in southern Qinghai[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(1): 87-93.
- [28] 马为民, 李明, 吴方劼, 等. 基于SVG的海上风电不控整流直流输电系统及控制方法: CN116154832A[P]. 2023-05-23.
- MA Weimin, LI Ming, WU Fangjie, et al. SVG-based offshore wind power uncontrolled rectification DC power transmission system and control method: CN116154832A[P]. 2023-05-23.
- [29] 张家玮, 张琛, 史先强, 等. 储能型静止无功发生装置及其自同步电压源控制[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 61-71.
- ZHANG Jiawei, ZHANG Chen, SHI Xianqiang, et al. Energy-storage-type static var generator and its autonomous-synchronization voltage source control [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 61-71.
- [30] 徐惠勇. 无功功率补偿中SVG技术的研究现状与发展[J]. 应用能源技术, 2012(2): 31-33.
- XU Huiyong. Reactive power compensation in SVG technology research present situation and the development[J]. Applied Energy Technology, 2012(2): 31-33.
- [31] 陈志斌. 静止无功发生器SVG综述[J]. 科技信息, 2012(7): 108, 93.
- CHEN Zhibin. Overview of static var generator SVG[J]. Science & Technology Information, 2012(7): 108, 93.
- [32] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [33] SUMI Y, HARUMOTO Y, HASEGAWA T, et al. New static var control using force-commutated inverters[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(9): 4216-4224.
- [34] SOBTINK K H, RENZ K W, TYLL H. Operational experience and field tests of the SVG at rejsby hede[C]//POWERCON '98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings. IEEE, 1998: 318-322.
- [35] TWINING E, NEWMAN M J, LOH P C, et al. Voltage compensation in weak distribution networks using a D-STATCOM [C]//The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. IEEE, 2004: 178-183.
- [36] 刘文华, 梁旭, 姜齐荣, 等. 采用GTO逆变器的 ± 20 Mvar STATCOM[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 19-23, 70.
- LIU Wenhua, LIANG Xu, JIANG Qirong, et al. Development of ± 20 Mvar statcom employing GTO inverters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(23): 19-23, 70.
- [37] 诸纪新. ± 50 Mvar STATCOM装置在上海电网中的应用[J]. 电力建设, 2006, 27(12): 14-17.
- ZHU Jixin. Application of ± 50 Mvar STATCOM in Shanghai power grid[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(12): 14-17.
- [38] 李斌, 张新雨, 何佳伟, 等. 计及保护动作时间协调配合的双馈风电场故障穿越策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(24): 1-10.
- LI Bin, ZHANG Xinyu, HE Jiawei, et al. Fault ride-through strategy for doubly-fed wind farms considering coordination of protection operation time [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(24): 1-10.
- [39] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2359.
- ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfeng, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [40] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
- WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [41] 刘钊汛, 秦亮, 杨诗琦, 等. 面向新型电力系统的电力电子变流器虚拟同步控制方法评述[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 1-16.
- LIU Zhaoxun, QIN Liang, YANG Shiqi, et al. Review on virtual synchronous generator control technology of power electronic converter in power system based on new energy [J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 1-16.
- [42] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 牵引变电所电能质量混合动态治理技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 48-55.
- ZHANG Dinghua, GUI Weihua, WANG Weian, et al. Hybrid dynamic power quality compensation technology for traction substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 48-55.
- [43] 刘健彝, 陈乔夫, 代少君, 等. 高压大容量串联混合型有源电力滤波器的关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 1-9, 179.
- LIU Jianben, CHEN Qiaofu, DAI Shaojun, et al. Key techniques of high-voltage and large-capacity series hybrid active power filters [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 1-9, 179.
- [44] 李双健, 杜夏冰, 贾秀芳, 等. 一种应用于LCC高压直流输电的级联H桥混合型有源滤波器[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1409-1416.
- LI Shuangjian, DU Xiabing, JIA Xiufang, et al. A cascaded H-bridge hybrid active power filter applied to LCC-HVDC[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1409-1416.

收稿日期: 2025-03-31 修回日期: 2025-05-14

作者简介:

马为民(1966),男,博士后,教授级高级工程师,研究方向为高压直流输电和柔性直流输电成套设计, E-mail: maweimin@chinasperi.sgcc.com.cn;

李明(1979),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为特高压直流和柔性直流输电技术;

薛英林(1986),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为高压直流输电技术;

王莹鑫(1995),女,博士,中级工程师,通信作者,主要研究方向为柔性直流输电技术, E-mail: 13620754288@163.com;

吴方劼(1981),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为高压直流输电技术;

赵峥(1986),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为高压直流输电技术;

李琛(1989),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为柔性直流输电技术。

(编辑 景贺峰)