

直流变压器光伏中压并网故障运行特性研究

奚鑫泽^{1,2}, 徐志¹, 高尚³

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044;
3. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:大型光伏电站中压直流汇集组网系统相比交流汇集系统有更高效率, 是未来规模化开发光伏资源的一种潜在有效途径。中压直流变压器是构建光伏中压直流汇集系统的核心设备之一。详细讨论光伏中压直流汇集系统对直流变压器的技术需求, 分析直流变压器的结构和控制方式, 针对其低压侧及高压侧短路故障特性提出相应的故障清除方法, 最后通过搭建仿真模型验证不同情形下分析过程及故障清除的可行性和有效性。

关键词:光伏; 中压直流汇集; 故障分析; 直流变压器

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.012 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2020)05-0089-07

Fault operation of DC transformer for the PV medium voltage DC grid

XI Xinze^{1,2}, XU Zhi¹, GAO Shang³

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China; 2. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The power collection and integration system of medium voltage DC in the large PV is more efficient than the traditional AC collection system, which is the potential area to develop the photovoltaic resources in the future. As one of the key components of power collection and integration system with medium voltage DC, DC transformer is analyzed in detail in this paper, including the technical requirements, structure and control method from the collection system. Then, the corresponding fault clearance methods are proposed when the short circuit fault happens in the low voltage or high voltage side. Finally, a simulation for fault operation analysis of DC transformer is included to verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: photovoltaic; DC power collection and integration; fault analysis; DC transformer

随着光伏发电的大规模发展, 平价上网逐渐成为业界关心的问题。中国东部地区光伏分布式发电“源—荷”就地平衡, 可实现本地消纳; 中西部地区光伏发电光照条件好, 且土地资源丰富, 目前大多采用大功率集中式电站发电, 然后通过交流汇集组网,

经升压变送至中压配网及高压输电网, 向东部及华南负荷中心远距离输电。长距离的汇集及输电线路会产生较大的充电功率, 需要增设大容量的无功补偿设备, 导致建设成本增加。

随着电力电子技术的发展和柔性直流输电技术

的成熟,风电及光伏电站借助直流汇集接入系统具备了一定可行性^[1-4]。目前传统单级式集中电站已逐步发展为集散式架构,其借助分散式直流模块向低压直流母线汇集能量,能有效提高发电量,降低系统维护成本。不仅如此,为提高系统效率,光伏直流侧电压配置有由传统 600、800 V 向 1 500 V 发展的趋势,全直流光伏发电与中高压直流组网的理念设计也得到行业内的认可。文献[5]描述了大容量光伏电站直流汇聚组网的 2 种架构,相比于交流汇集,直流汇集架构的能效提升可达到 6%~8%,大大降低了损耗。

直流变压器是构建直流电网的核心设备之一。国际大电网会议报告指出了 DC/DC 变换器在直流系统中的应用需求,包括不同的功率等级、变比设置等方面^[6]。文献[7]探讨了高压直流输电网用高压 DC/DC 变换器隔离需求,侧重于模块化多电平(modular multilevel converter, MMC)拓扑,其研究方法可推广至中压直流系统;文献[8]基于 MMC 架构,从应用于海上直流风电场中的多端口直流变电站基本需求出发,从变比、故障隔离、容量等几方面展开详细分析与对比^[9];文献[10]进一步提出了功率可双向流动的链式自耦直流变压器,但更多应用于中高压直流电网互联的输电网场景。对于大型光伏电站中压直流汇聚组网需求,目前研究较少,文献[11]提出了一种双有源桥(dual active bridge, DAB)直流变压器电路在中压直流电网中的控制及效率提升方法。考虑到光伏升压变换单向潮流特性,DAB 副边采用有源开关,在提高控制自由度的同时,增加了系统成本和控制难度。

针对光伏中压直流汇集系统中直流变压器需求,根据升压比需求,基于隔离型架构,该文首先讨论了光伏中压直流汇集系统对直流变压器的技术需求,然后针对其故障特性尤其是低压侧及中压侧短路场景展开系统分析及评估,最后给出相应仿真验证及总结,并指明后续研究方向。

1 直流变压器需求分析

光伏组件单元额定电压较低,需要串联实现阵列输出,经 Boost 直流模块实现最大功率跟踪,汇集

在低压直流母线侧。考虑低压直流断路器、功率器件较为成熟,目前业界主流低压直流母线电压通常取 800 V,如组串式逆变器内部直流母线电压、集散式逆变器开放式中间直流母线电压。

德国亚琛工业大学中压直流电压选定为 ± 5 kV,中国中压直流配电系统电压等级序列优选值为 ± 35 、 ± 10 、 ± 3 kV,其中 ± 3 kV 应用较少, ± 10 kV 直流更易与目前 10 kV 交流系统互联; ± 35 kV 直流更易与目前 20 kV 交流系统互联。对 ± 10 kV 直流输出,光伏升压比达 25,属于高升压比类型。目前高升压比电路主要基于耦合电感、变压器、开关电容等类型及其组合发展而来。由于对开关电容充电时会产生尖峰电流,因此不能直接用于高电压大容量场合。

1.1 高电压应力

光伏中压直流汇集系统中直流变压器接入中压直流电网时,中压侧器件电压应力较高。根据目前商用功率半导体器件现状,中压侧将采取器件串联或模块串联形式。

对于隔离型电路,副边需进一步整流滤波获得直流电压。如采用 LC 滤波器,其引发的电压尖峰在高压场合限制了器件的选择,此时电容滤波是优选方案。

1.2 故障隔离及恢复供电能力

直流无自然过零点,故障熄弧困难;且直流系统阻尼低,故障电流上升速度快,故对故障辨识及隔离速度提出较高要求。由于主流商用全控型器件容量相对晶闸管阀组较小,IGBT 阀组往往在故障后将迅速闭锁,很难做到故障穿越,所以直流变压器必须具备故障隔离能力,尽量避免故障扩散导致系统解列。

考虑到 10 kV 以上中压直流断路器目前尚未成熟,系统转供较为困难,因此直流变压器需要具备在故障清除后快速恢复供电能力,类似交流系统“重合闸”。

1.3 绝缘要求

光伏直流汇集系统的母线电压常达数十千伏,若光伏阵列与中压母线间没有电气隔离设计,则光伏阵列及 Boost 直流模块需要按中压设计对地绝缘。

不仅如此,若直流变压器一侧发生单极接地故障时,非故障极对地电压变为额定值的 2 倍。如果两侧无电气隔离,另一侧线路对地电压也会抬升至 2 倍的额定电压,故单极接地故障会通过直流变压器蔓延至另一侧^[11-12]。

因此,考虑直流变压器中加入中高频隔离变压器,一方面可以实现电气隔离,降低光伏系统的绝缘要求,另一方面可提高整个汇集系统的供电可靠性。

1.4 单向大功率传输特征

光伏中压直流汇集系统中直流变压器最前端为光伏阵列,不存在潮流反向问题,因此无需考虑双向功率变换,在一定程度上减轻了变流器设计难度。

目前光伏电站中大功率集中式逆变器功率普遍在 500 kW 甚至 1 MW,直流变压器容量需要与其相当以便更好地匹配。为提高投资收益,光伏发电侧往往组件超配,目前容配比已达 1.2 : 1,因此其必须具备一定过载能力。

2 光伏中压直流汇集系统中直流变压器

2.1 应用场景、电路指标及拓扑选取

光伏直流升压汇集并网系统架构如图 1 所示,集散式光伏阵列并联接入低压直流母线,通过直流升压变流器汇集至中压直流系统,最后经 MMC 逆变输出至三相交流电网。根据对直流变压器需求分析,表 1 给出直流变压器仿真参数,借助高频变压器阻断故障,高压侧采用二极管器件,提高短路能力和降低成本,两侧采用电容滤波。仿真中选取单模块等效方案,未采用输入并联输出串联架构,如图 2 所示。

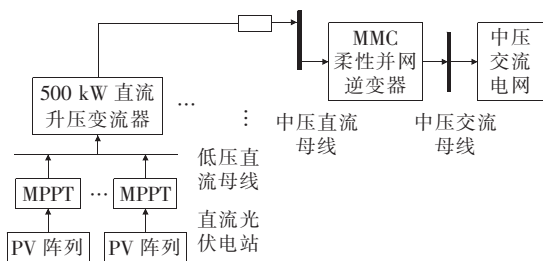


图 1 大型光伏直流升压汇集接入系统拓扑

Figure 1 Topology of the large-scale photovoltaic DC

boost collection and integration system

表 1 隔离式直流变压器仿真参数

额定功率/MW	母线电压/kV		电气隔离	中压侧结构	滤波器
	低压直流	中压直流			
0.5	0.8	35	有	二极管整流	电容滤波

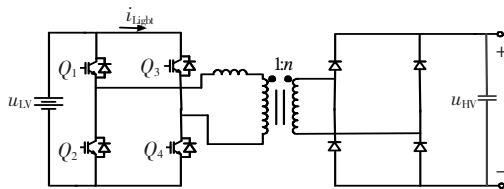


图 2 一种直流变压器拓扑

Figure 2 A topology of the DC transformer

2.2 控制方式

如图 1 所示,直流变压器介于光伏最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)直流模块及并网 MMC 变流器中间。光伏 MPPT 直流模块包含太阳能板和升压斩波电路,其最大功率跟踪采用电压扰动法^[13],且不控制其输出电压,实现成本最低化。直流变压器实现升压和隔离功能,两侧工作电压稳定,采用开环控制方式,控制难度大大降低,低压侧电压由中压侧电压间接稳定。并网 MMC 变流器^[14]采用半桥子模块结构,控制子模块电容电压均衡和中压直流侧母线电压,即子模块均压策略和外环控制直流侧电压、内环控制交流侧电流的双环控制策略。

3 直流母线短路故障特性分析

3.1 低压母线短路故障及故障清除

直流变压器输入低压母线由若干分支低压馈线接入,任一直流光伏 MPPT 模块局部馈线输出短路故障时,低压直流母线全部掉电。同时,在不控整流电路中功率不可反向流动,中压直流系统不会向低压短路点馈入故障电流。

此时,中压母线继续向电网送电,MMC 变流器前馈控制减小,并网电流维持系统不脱网,仅有部分功率损失。当故障清除后,可以重新恢复全功率供电。

3.2 中压母线短路故障及故障清除

中压直流母线电压与众多直流变压器中压侧直接互联,故障影响范围广。若某一点发生短路故障,一方面滤波电容会被直接短路,向故障点快速放电;

另一方面直流变压器中压侧电压变为零,低压侧电流急剧增大。直流变压器的过流保护装置将及时闭锁低压侧阀组的触发脉冲,保护器件和设备本体。此时,直流变压器中的高频变压器能清除自身故障电流,起到与中压系统断开的效果。

此时,由于输入侧光伏最大功率模块仍在持续输出,低压母线电压将持续上升,触发光伏模块过压保护,光伏直流模块将全部退出运行,系统解列。低压母线电压将维持在较高水平,有助于系统故障清除后,缩短启动时间。

4 系统仿真验证

4.1 光伏直流汇集系统仿真模型

为进行光伏中压直流系统中直流变压器的性能分析,在 Psim 数字平台上建立如图 1 所示的系统模型。仿真中一个光伏 MPPT 模块集群的最大容量设为 0.125 MW,4 组相同的光伏集群并联等效为集散式光伏阵列(实际可以采用 5 组 50 kW 商用模块并联组成)。由于并网逆变器采用模块化多电平拓扑,其内部电力电子器件众多,采用传统的详细模型导致仿真时间过长等问题。因此,MMC 并网逆变器采用基于平均方法的受控源模型^[15]。系统路仿真参数如表 2~4 所示。

表 2 单组光伏模块仿真参数

Table 2 Simulation parameters of the single group photovoltaic module

温度/ ℃	光照强度/ (W/m ²)	开路电 压/V	短路电 流/A	最大功率点 电压/V	最大功率点 电流/A
25	1 000	700	300	500	250

表 3 直流变压器仿真参数

Table 3 Simulation parameters of the DC transformer

额定电压/V	额定容量/MW	隔离变压器变比	频率/Hz
800/35 000	0.5	7 : 360	10 000

表 4 模块化多电平逆变器仿真参数

Table 4 Simulation parameters of the MMC

额定 容量/ MW	交流侧 线电压 有效 值/kV	直流 侧电 压/kV	单桥臂 MMC 模块数	电压外 环比例 参数 K_{PV}	电压外 环积分 参数 K_{IV}	电流内 环比例 参数 K_{PV}	电流内 环积分 参数 K_{IV}
	0.5	20	35	5	0.8	3.33	5

4.2 系统稳定运行仿真

由图 3 可以看出,最大功率点电压为 500 V,电流为 250 A,单组光伏输出功率在 0.2 s 后稳定在最大功率 125 kW,低压直流侧电压稳定在 800 V,直流变压器高压侧电压是由 MMC 型逆变器前馈稳定控制输出在 35 kV。在图 3(f)中,逆变器并网侧向电网注入幅值约为 20 A 的有功电流。

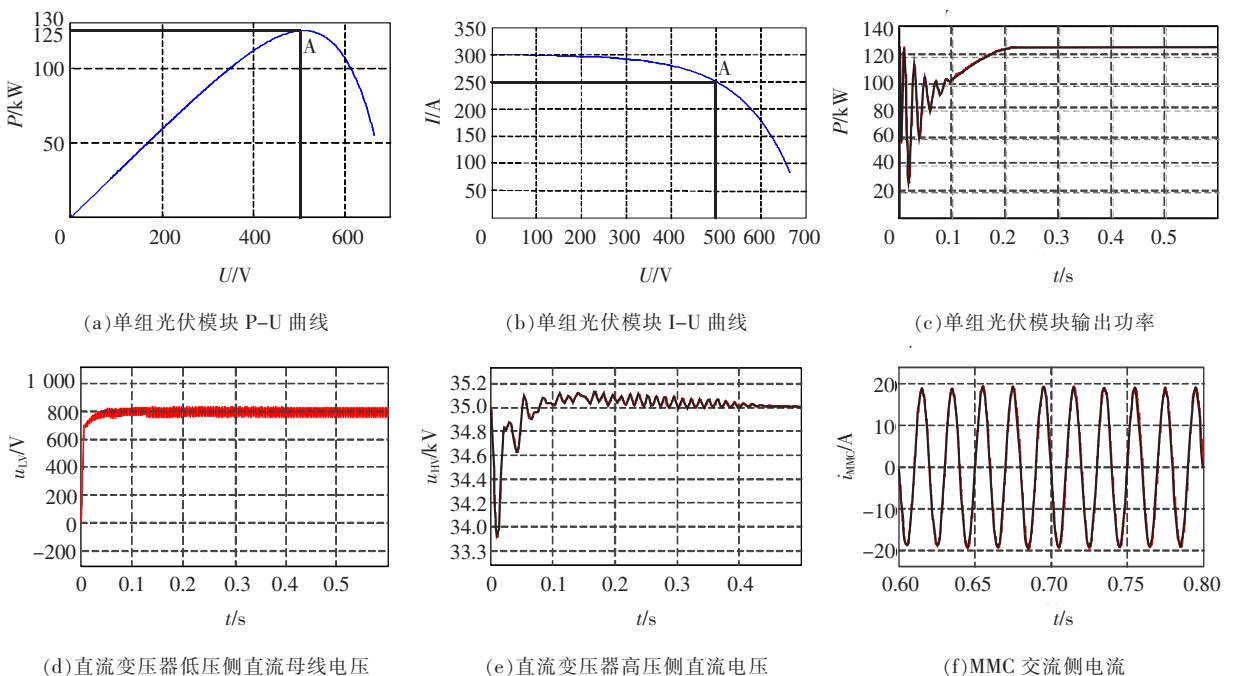


图 3 稳定运行时光伏直流汇集系统仿真波形

Figure 3 Waveform diagrams of photovoltaic DC collection and integration system simulation under normal operation

4.3 短路故障仿真

1) 直流变压器低压侧局部短路故障。

光伏阵列由 4 组光伏模块集群组成,仿真中设置光伏模块集群 1 在 1 s 的时刻发生短路故障,由于直流变压器的二极管整流电路不具备功率双向流动特点,中压侧系统并不会向低压侧短路点馈入故障电流。

从图 4 看出,在仿真 1~1.2 s 时,整个直流母线掉电,直流变压器低压侧电流变为 0,高压侧直流电压跌落,并网电流畸变,但能维持输出不脱网运行。

在 1.2 s 时刻,故障模块集群 1 被隔离,直流变压器高低压侧电压又趋于稳定,1.35 s 时刻光伏模块集群 2、3、4 重新进入最大功率跟踪状态。并网侧电流正弦波输出,幅值相比于故障前略微降低,这是由于光伏模块集群有一组故障退出运行造成的。

2) 直流变压器中压侧短路故障。

设置光伏直流汇集系统中压线路在仿真运行至 1 s 时发生短路故障,当经过直流变压器的短路电流超过保护装置的设定值后,在 1.000 1 s 及时闭锁直流变压器阀组的触发信号。同时,光伏模块组件保护装置检测到输出电压超过阈值,在 1.01 s 之后将光伏模块全部退出运行。

从图 5(a)中可以看出,直流变压器高压侧电压在 1 s 时刻变为 0。同一瞬间,直流变压器上全控型开关器件上的电流急剧升高,并在 1.000 1 s 变为 0,这是直流变压器阀保护动作的结果,如图 5(b)。在图 5(c)中,光伏直流模块输出电压在短路故障后开始急剧上升,直到 1.01 s 光伏模块退出后停止上升并稳定在 1 080 V 左右,未超过保护限值 1 200 V。在故障清除后,系统重新恢复上电运行(发生故障时并网逆变器交流侧被保护断开,此处不详细分析交流侧波形)。

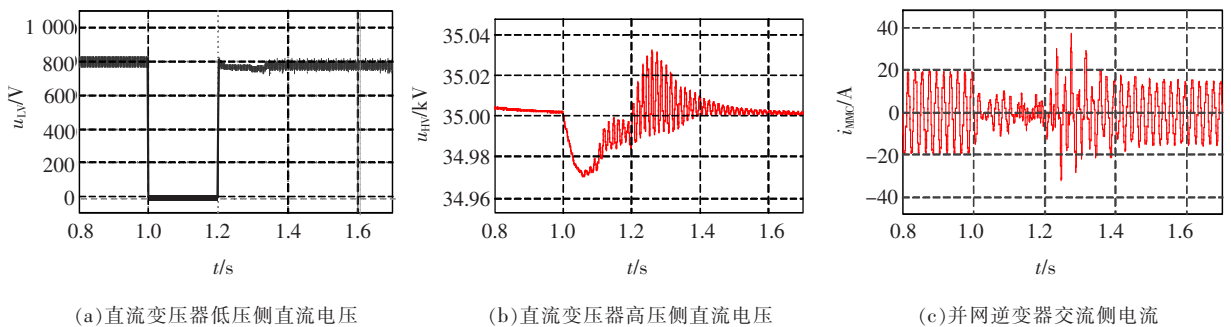


图 4 直流变压器低压侧故障下光伏直流汇集系统仿真波形

Figure 4 Simulation waveforms of photovoltaic DC collection and integration system under fault condition on the low-voltage side of the DC transformer

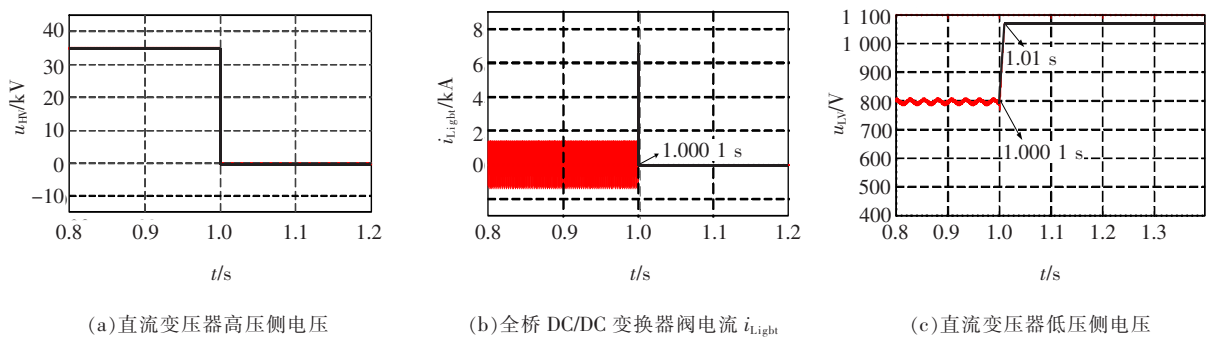


图 5 中压线路短故障下光伏直流汇集系统仿真波形

Figure 5 Simulation waveforms of photovoltaic DC collection and integration system under fault condition on the medium-voltage DC line

5 结语

1) 光伏直流汇集系统中的直流变压器具有高升压比、单向大功率传输特征。考虑高、低压侧电缆及相关设备的绝缘成本及运行安全性,宜采用隔离型 DC/DC 变换器;考虑中压侧高电压应力,隔离型 DC/DC 变换器宜采用电容滤波方案;直流变压器输入侧及输出侧电压变化较窄,工作点稳定,便于优化系统设计及效率,可以采取开环运行方式。受目前 IGBT 阀组容量限制,直流变压器直流故障穿越很难实现,直流变压器必须具备故障隔离能力,尽量避免故障扩散导致系统解列。如系统严重故障不可避免解列,需保证设备自身安全,并在故障清除后快速恢复供电能力。

2) 光伏直流汇集系统中直流变压器低压侧,局部光伏模块故障时,故障光伏模块被识别并退出运行,整个光伏直流汇集系统能够继续正常运行,仅损失部分功率输出。

光伏直流汇集系统中直流变压器中压侧故障时,直流变压器阀组的开关信号会被保护装置及时闭锁。由于输入侧光伏最大功率模块仍在持续输出,低压母线电压将持续上升,触发光伏模块过压保护,光伏直流模块将全部退出运行,系统解列。后续将进一步展开相关研究,减缓系统解列影响。

参考文献:

[1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[2] 方印, 习培玉, 申庆斌, 等. 计及“源—网—荷”成本效益的可再生能源渗透率影响量化分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(5): 43-50+58.

FANG Yin, XI Peiyu, SHEN Qingbin, et al. Quantitative analysis of the impact of renewable energy penetration on the cost-effectiveness of "supply-grid-load"[J]. 2019, 47(5): 43-50+58.

[3] 王跃峰. 德国新能源发电发展和运行研究[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 112-121.

WANG Yuefeng. Research on development and operation of renewable energy generation in German[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 112-121.

[4] 潘垣, 尹项根, 胡家兵, 等. 论基于柔直电网的西部风光能源集中开发与外送[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3621-3629.

PAN Yuan, YIN Xianggen, HU Jiabing, et al. Centralized exploitation and large-scale delivery of wind and solar energies in west china based on flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3621-3629.

[5] Siddique H A B, De Doncker R W. Evaluation of DC collector-grid configurations for large photovoltaic parks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 33(1): 311-320.

[6] Barker C D, Davidson C C, Trainer D R, et al. Requirements of DC-DC converters to facilitate large DC grids [C]//International Council on Large Electric Systems, Paris, France, 2012.

[7] 王新颖, 汤广福, 魏晓光, 等. MMC-HVDC 输电网用高压 DC/DC 变换器隔离需求探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 172-178.

WANG Xinying, TANG Guangfu, WEI Xiaoguang, et al. Discussion on isolation requirement of high voltage DC/DC converter for MMC-HVDC transmission systems[J]. Automation of electric power systems, 2017, 41(8): 172-178.

[8] 杨仁焯, 孙长江, 蔡旭, 等. 应用于海上直流风场的模块化多电平多端口直流变电站拓扑探究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(S1): 61-68.

YANG Renxin, SUN Changjiang, CAI Xu, et al. Exploration on topologies of modular multilevel multi-port DC-DC substations applied in offshore DC wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 61-68.

[9] 杨晓峰, 林智钦, 郑琼林, 等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 1-15.

YANG Xiaofeng, LIN Zhiqin, ZHENG Qionglin, et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-15.

[10] 游洪程, 蔡旭. 应用于直流电网的直接耦合式直流变压器[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2516-2525.

- YOU Hongcheng, CAI Xu. Direct-coupled DC transformers applied to DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2516-2525.
- [11] 卢林煜,王鲁杨,柏扬,等. 面向能源互联网的固态变压器中双有源桥直流变换器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 141-150.
- LU Linyu, WANG Luyang, BAI Yang, et al. Research on dual-active-bridge DC-DC converter in solid state transformer for energy internet [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 141-150.
- [12] 魏晓光,王新颖,高冲,等. 用于直流电网的高压大容量 DC/DC 变换器拓扑研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(S1): 218-224.
- WEI Xiaoguang, WANG Xinying, GAO Chong, et al. Topologies research of high voltage and high power DC/DC converters used in DC Grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 218-224.
- [13] 杜娟,赵兴勇. 基于扰动观察法的光伏发电系统 MPPT 控制策略[J]. 电力学报, 2017, 32(4): 269-274.
- DU Juan, ZHAO Xingyong. Control strategy of MPPT of photovoltaic system based on perturbation and observation method[J]. Journal of Electric Power, 2017, 32(4): 269-274.
- [14] 蔡洁,夏向阳,李明德,等. 高压直流输电模块化多电平换流器拓扑研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 54-59.
- CAI Jie, XIA Xiangyang, LI Mingde, et al. Study of MMC topologies in HVDC system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 54-59.
- [15] 高朋,胡学浩,温家良,等. 基于大规模子模块群的 MMC 建模与快速仿真算法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1226-1232.
- GAO Peng, HU Xuehao, WEN Jialiang, et al. A large-scale submodule group based algorithm for modeling and high-speed simulation of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1226-1232.
- (上接第 88 页 Continued from page 88)
- [15] 江斌开,王志新. 基于 VSC-MTDC 的平均值建模与控制策略[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(3): 1-8.
- JIANG Binkai, WANG Zhixin. Average-value modeling and control strategy of VSC-MTDC[J]. Electric machines and Control, 2018, 22(3): 1-8.
- [16] 许建中,赵成勇,刘文静. 超大规模 MMC 电磁暂态仿真提速模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 114-120+11.
- XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, LIU Wenjing. Accelerated model of ultra-large scale MMC in electromagnetic transient simulations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 114-120+11.
- [17] 张宏俊,郝正航,陈卓,等. 适用于模块化多电平换流器实时仿真的建模方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 120-126.
- ZHANG Hongjun, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, et al. Modeling method for real time simulation of modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 120-126.
- [18] 辛业春,江守其,李国庆,等. 柔性直流输电系统数字物理混合仿真改进阻尼阻抗接口算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 90-97.
- XIN Yechun, JIANG Shouqi, LI Guoqing, et al. Improved damping impedance interface algorithm of power hardware-in-the-loop simulation for flexible DC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 90-97.
- [19] 李国庆,江守其,辛业春,等. 柔性高压直流输电系统数字物理混合仿真功率接口及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1915-1924.
- LI Guoqing, JIANG Shouqi, XIN Yechun, et al. A novel interface algorithm of power hardware-in-the-loop simulation for MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1915-1924.