DOI:10.14188/j.1671-8844.2025.0025　　文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-12

台区集成型多端口储能变流器拓扑及控制

朱非白[1],徐群伟[1],潘星[1],彭珉轩[2,3],庄凯勋[2,3],孙建军[2,3]

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014;2. 武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072;3. 综合能源电力装备及系统安全湖北省重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要:新能源发电接入电网,使负荷特性其具有波动性和间歇性的特点,致使传统配电网台区在随机潮流影响下容易发生电压过限问题。基于复合三端口变流器结构,提出了一种台区集成型多端口储能变流器拓扑及其电能质量控制策略。所提拓扑由含有曲折接法的四绕组变压器以及三端口变压器构成,将原有的台区变压器改造成曲折接法,进而实现储能变流器的多端口化。所提拓扑的并网端感应低交流电压实现了调制裕度的提升,同时可接入超级电容与储能电池形成储能集成型设备。本文针对所提拓扑进行了原理分析,并提出其控制策略,功能上实现并网模式下多类型电能质量问题治理与孤岛运行模式下负载稳定供电,最后通过仿真分析验证了所提拓扑与控制策略的可行性。

关键词:储能变流器;配电网台区;电能质量治理;新能源接入

中图分类号:TM 46　**文献标志码:**A

Topology and control method of an integrated multi-port energy storage converter

ZHU Feibai[1], XU Qunwei[1], PAN Xing[1], PENG Minxuan[2,3], CHUANG Kaihsun[2,3], SUN Jianjun[2,3]

(1. Electric Power Scientific Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310014, China;

2. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

3. Hubei Key Laboratory of Power Equipment and System Security for Integrated Energy, Wuhan 430010, China)

Abstract: The integration of new energy generation into the power grid results in fluctuating and intermittent load characteristics, which makes traditional distribution network areas prone to voltage overload problems under the influence of random power flow. This article proposes a topology and power quality control strategy for an energy storage integrated power electronic court device based on a composite three-port converter structure. The proposed topology consists of a four-winding transformer with a zig-zag connection and a three-port transformer. The original platform transformer is transformed into a zigzag connection method to realize the multi-port of the energy storage converter. The grid-connected port excites low AC voltage to improve the modulation margin. Meanwhile, it can be connected to supercapacitors and energy storage batteries to form an integrated energy storage device. This paper analyses the principle of the proposed topology. The control

收稿日期:XXXX-XX-XX

作者简介:朱非白(1994-),女,工程师,硕士,主要从事电能质量治理研究,E-mail: 1554128647@qq.com。

通信作者:庄凯勋(2000-),男,硕士生,主要从事电力电子并网控制研究,E-mail: rex_zhuang@whu.edu.cn。

基金项目:国家电网公司科学技术项目(名称:新型电力系统全场景供电电压质量溯源提升技术研究与应用)(编号:B311DS23000L)。

本文引用格式:朱非白,徐群伟,潘星,等.台区集成型多端口储能变流器拓扑及控制[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-12.

Citation:ZHU Feibai, XU Qunwei, PAN Xing, et al. Topology and control method of an integrated multi-port energy storage converter[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-12.

strategy is proposed as well, which realizes multiple types of power quality problems management in the grid-connected mode and the stable power supply to loads in the islanded operation mode. Finally, the simulation cases verify the feasibility of the proposed topology and control strategy.

Key words: Energy Storage Converter; Distribution Network Court; Power Quality Government; Renewable Energy Integration

近年来,全球范围内可再生能源的快速发展及其大规模接入电网,给电力系统的运行带来了诸多挑战[1][2]。光伏和风能等分布式电源的出力具有波动性和间歇性,与电网负荷的变化特性存在显著差异,使得电网电压的波动性显著增加,配电网面临的电能质量问题日益突出,特别是电压偏差、谐波污染和电压暂降等问题[3][4]。

电压波动和低电压问题主要由分布式电源的不稳定性、负荷波动及电力电子设备的非线性特性引起[5]。这些问题不仅影响电力系统的安全运行,还对终端用户设备的性能产生不利影响,甚至导致设备损坏。为了解决配电网中的电压问题,传统方法主要依赖于无功补偿和调压设备,如静止无功补偿器、可控电抗器、静止同步补偿器以及电压调节器等[6]-[10]。这些设备通过调节无功功率来维持电压水平,是当前电压治理中的常见手段之一。然而,传统的无功补偿设备响应速度有限,在处理因分布式能源接入引起的快速电压波动时,效果不佳,无法满足现代电网快速动态调节的需求。随着电力电子技术的发展,配电网电压治理逐步转向智能化、分布式和多层次化的方向。例如,基于分布式控制策略的有源滤波器与静止无功发生器协同工作是近年来的重要研究方向之一[11]。文献[12]提出的基于电压检测型有源滤波器与静止无功发生器的协同配置策略,可以同时解决谐波污染和电压波动问题,通过实时检测电压偏差快速调整无功补偿量,从而提升配电网的电压稳定性。此外,文献[13]研究了基于一致性算法的谐波分布式治理策略,该策略通过在配电网中部署多个小型补偿装置,实现谐波和电压的全局优化治理,有效改善了电压质量。

随着配电台区中电力电子化程度日益提升,台区中存在各类型电力电子设备。基于设备复用与装置利用率最大化的思想,提出具备多功能电能质量治理能力的电力电子设备拓扑与控制策略成为配电网电压治理这一系列问题的重要手段。多端口电力电子变换器因其能够灵活地在多个直流和交流端口之间调节能量流动,被认为是提升新能源系统稳定性的重要技术之一[14]。最初的研究集中于双向DC/DC变换器和AC/DC变换器,用于实现储能设备的充放电控制。随着对新能源利用效率的要求不断提高,三端口变换器(Three-Port Converter, TPC)逐步成为关注焦点。TPC能够同时接入新能源发电、储能装置和电网,并通过多种能量调度策略优化系统运行[15]。文献[16]提出了一种三端口变换器,可在光伏、储能和电网之间实现灵活的能量交换,有效提升了系统的能量利用率和并网稳定性。文献[17]研究了一种高频三端口变换器,通过提高开关频率和优化磁性元件设计,实现了高效的能量传输。与此同时,模块化设计能够根据新能源和储能设备的不同需求灵活配置,从而实现从低功率到高功率的不同扩展应用。多端口变换器通过简化拓扑结构,实现了多种电源与储能装置的集成管理,减少了功率转换过程中的损耗[18]。通过引入电网特征,可进一步利用光伏与储能进行电网电能质量治理。

本文提出了一种具备电压质量治理能力的台区集成型多端口储能变流器拓扑与控制策略。相较于传统的配电台区电能质量治理设备,本文所提的多端口拓扑结构在器件上实现集成复用,并在整合超级电容或蓄电池的基础上,实现了配电台区多类型电能质量问题治理与孤岛运行模式下的负载稳定供电。经由仿真验证,本文所提台区集成型多端口储能变流器在端口间功率变换和电能质量治理等方面均展现较为优异的效果。

1 台区集成型多端口储能变流器拓扑分析

1.1 拓扑结构

本文所提台区集成型多端口储能变流器将配电台区已有变压器进行改造,并将三端口变换器与变压器的多个绕组巧妙相连,其具体拓扑结构如图1所示。

本文所提拓扑的核心在于采用一个四绕组变压器与一个四桥臂三端口变流器。四桥臂三端口变流器是本装置的核心部件之一,由四个半桥构

成，每个桥臂包含两个功率开关（Insulated Gate Bipolar Transistor，IGBT），并配备L型滤波器用于平滑电流输出。三个端口分别为交流端口、直流端口1和直流端口2。其交流端口用于与电网侧的交流连接，实现网侧功率交互；高压直流端口通过与超级电容连接，实现快速功率调节，适应高频功率波动；低压直流端与蓄电池连接，用于长期功率平衡和能量存储。超级电容具有较大的功率密度，能够在短时间内迅速响应功率需求；蓄电池具有较高的能量密度，适合用于日常负荷的平滑调节和备用电源。值得注意的是，相较于常规的三端口变流器，本文所提的台区集成型储能变流器引入零序端口，即采用四桥臂变流器的根本目的，用于抑制不平衡负载引起的零序电流，确保电网侧电流的平衡性。

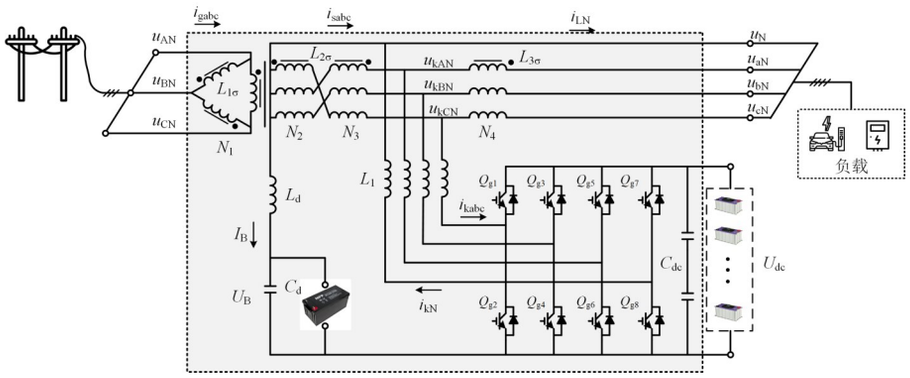


图1 储能集成型电力电子台区拓扑结构

Fig.1 The topology structure for an energy storage integrated power electronic court device

在图1中，中压电网三相电压分别为u_{AN}、u_{BN}、u_{CN}，并网端三相电压分别为u_{kAN}、u_{kBN}、u_{kCN}，副边端口电压分别为u_{aN}、u_{bN}、u_{cN}、u_N，原边三相电流为i_{gabc}，曲折变电流为i_{sabc}，负载电流为i_{Labc}，N段负载电流为i_{LN}，变流器输入电流为i_{kabc}，输出N线电流为i_{kN}，高压直流电压为U_{dc}，低压直流电压为U_B，低压直流电流为I_B；原边绕组漏感为$L_{1\sigma}$，曲折接法的两个副边绕组漏感为$L_{2\sigma}$，副边输出绕组漏感为$L_{3\sigma}$；变流器三相L型滤波器电感为L_1，高压直流电容为C_{dc}，超级电容等效为C_p，低压直流电感为L_d，低压直流电容为C_d，Q_{g1}至Q_{g8}为所采用四桥臂变流器的8个开关管。

三端口变流器采用四桥臂全桥结构，桥臂中点均通过L型滤波器与并网端三相端口以及N端口连接，桥臂两端通过电解电容作为高压直流侧端口并与超级电容相连，低压直流侧通过电容与电池相连。

四绕组变压器中，原边绕组接入中压电网，并采用三角接法以隔绝零序电流的流通；副边绕组含有三组绕组，其中两个绕组采取曲折接法，其中性点引出既作为N端出线，又通过LC连接形成低压直流端口，其输出端作为变流器并网端口，另一个绕组作为串联电压形成副边输出端口连接低压电网。变压器变比也需要满足如公式（1）所示的匝数比，匝数分别为N_1、N_2、N_3、N_4。考虑到变压需求与Y型与Δ型接法，满足该变比既可实现10kV中压电网向380kV低压电网进行电压变换，同时可尽可能增大四桥臂变流器的调制裕量以实现其他的电能质量治理功能。

$$N_1:N_2:N_3:N_4 = 17320:173:173:90 \tag{1}$$

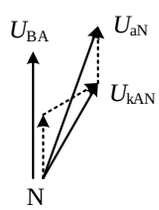


图2 变压器匝数比

Fig.2 Ratio of the transformer.

值得注意的是，四绕组变压器同时参与AC/DC与DC/DC变换，进而，以下对拓扑潜在的直流偏磁问题开展分析。首先，在变压器选型方面，采用三相三柱芯式变压器，其铁芯内部不存在直流磁通环路。其次，在绕组绕线方面，绕组N_2上的直流电流会在同一个铁芯柱上互相抵消直流磁动势，绕组N_3上的少量直流电流仅在铁芯外部产生直流漏磁，因此都不会使铁芯受直流偏磁的影响。

以下围绕所提拓扑中的两个核心功率传输回路展开分析，本文所提的拓扑的核心功率传输回路由AC/DC回路与DC/DC回路组成。

1.1.1 AC/DC功率传输回路

AC/DC回路可视为一个三相四桥臂变流器，如图3所示，进而实现网侧功率与超级电容进行功率交换。根据电网实时的功率特性，调节直流侧超级电容的释放或吸收功率。

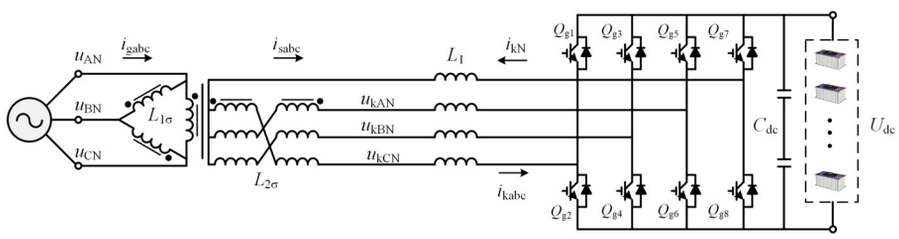


图3 AC/DC功率传输回路

Fig.3 Circuit of the AC/DC power transmission

dq旋转坐标系下的功率方程如(2)公式所示。

$$\begin{cases} P_g = \dfrac{3}{2}u_{gd}i_{gd} + \dfrac{3}{2}u_{gq}i_{gq} \\ Q_g = \dfrac{3}{2}u_{gq}i_{gd} - \dfrac{3}{2}u_{gd}i_{gq} \end{cases} \tag{2}$$

式中，P_g与Q_g分别为传输的有功与无功功率，u_{gd}与u_{gq}为u_{AN}、u_{BN}、u_{CN}经由dq坐标变换得到的网侧电压dq分量，i_{gd}与i_{gq}为i_{gabc}经由dq坐标变换得到的网侧电流dq分量。

根据对称分量法，当电网投入不对称运行负载或发生不对称故障时，如单相接地故障与两相故障时而造成的电压不平衡问题，零序电压可对其进行补偿与治理。如公式(3)所示，不对称运行下将产生负序与零序电压问题。然而，传统的三桥臂变流器由于采用Y型接法，无法实现零序电流的流通，进而无法实现零序电压补偿。因此，第四个桥臂的引入可对电网进行电压不平衡治理。

$$\begin{cases} U_1 = \dfrac{1}{3}\left(U_{AN} + aU_{BN} + a^2U_{CN}\right) \\ U_2 = \dfrac{1}{3}\left(U_{AN} + a^2U_{BN} + aU_{CN}\right) \\ U_0 = \dfrac{1}{3}\left(U_{AN} + U_{BN} + U_{CN}\right) \end{cases} \tag{3}$$

式中，U_1，U_2，U_3分别为正序、负序与零序分量，a为对称分量法计算中的转换算子。

1.1.2 DC/DC功率传输回路

DC/DC回路如图4所示，本质上为交错型Buck/Boost电路的改进形式。采用此类型的Buck/Boost电路优势在于其拓扑与AC/DC电路具有较高的相似性，进而，为了减少开关管数量，可将AC/DC与DC/DC回路进行复合。

DC/DC回路的功率流动表达式如公式(4)所示。

$$P_{DC1} = U_B I_B \tag{4}$$

式中，P_{DC1}为低压直流侧传输的功率。

根据基尔霍夫电压定律，直流回路的电压方程如公式(4)所示。

$$L_{dc}\frac{\mathrm{d}I_B}{\mathrm{d}t} = U_B - \bar{u} - R_{dc}I_B \tag{5}$$

其中，u_ _为变流器输出端口的平均值电压，L_{dc}与R_{dc}分别为直流回路中的等效电感与电阻，可进一步写为如下形式。

$$\begin{cases} L_{dc} = L_d + \dfrac{1}{3}(2L_{2\sigma} + L_1) \\ R_{dc} = \dfrac{1}{3}(2R_{2\sigma} + r_1) \end{cases} \tag{6}$$

式中，L_1与R_1为变流器三相L型滤波器电感与电阻，$L_{2\sigma}$与$R_{2\sigma}$为曲折接法的副边绕组漏感与电阻。

1.2 装置工作模式与功率传递分析

本文所提台区集成型多端口储能变流器将配电台区已有变压器进行改造，并将三端口变换器与变压器的多个绕组巧妙相连，其具体拓扑结构如图1所示。

本文所提的台区集成型多端口储能变流器拓扑具有多种工作模式，具体如图5所示。根据功率的输入个数与输出个数可分为6种不同工作模式，分别为单输入单输出1、单输入单输出2、单输入单输出3、多输入多输出1、多输入多输出2和单输入多输出。以下分析中，P_g为设备与电网传输的功率，P_{DC1}与P_{DC2}分别为低压直流侧与高压直流侧传输的功率。

(1)单输入单输出1：在电网发电充足且负载需求不高的情况下，所提装置中的储能设备可以利用此时电力的充裕性进行充电，充分吸收电网多余的电能。这种操作不仅提高了系统的能源利用率，同时也为未来高负荷或紧急情况提供了备用能源。通过合适的时间段进行充电，避免了在负载高峰期

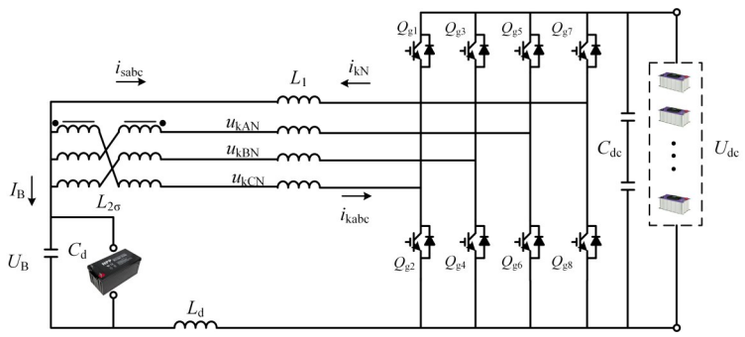


图4 DC/DC功率传输回路

Fig.4 Circuit of the DC/DC power transmission

或发电不足时对电网的额外压力，实现了削峰填谷的作用。

$$P_g = P_{DC1}, P_{DC2} = 0 \tag{7}$$

（2）单输入单输出2：在光伏发电不足或夜间时，光伏电源无法提供足够的能量，电网负荷的稳定性可能受到影响。此时，储能装置通过所提装置释放先前存储的能量，以弥补光伏发电的不足，保持电网的供电稳定性。这一过程实现了储能装置的“削峰填谷”功能，使其能够在白天充电、夜间放电，平衡日夜之间的能源供应差异，满足不间断供电需求，从而提升电网的负荷调节能力。

$$P_g = P_{DC1}, P_{DC2} = 0 \tag{8}$$

（3）单输入单输出3：当光伏发电量充足时，通过所提装置的功率流向控制功能，优先将光伏电能输送至电网，尽可能减少弃风弃光事件发生的次数。在电力需求较大或电网频率波动较大的情况下，光伏发电的及时并网有助于缓解电力需求，提高电能质量。此外，优先并网机制可避免光伏系统因为发电过剩而限发的问题。

$$P_g = P_{DC2}, P_{DC1} = 0 \tag{9}$$

（4）多输入多输出1：在特殊情况下，如突发的电压波动或电力系统不稳定时，储能装置和光伏系统可通过所提装置共同参与电网调节，通过无功功率的调节来提供电压支撑。此时，储能和光伏系统协同工作，根据电网的实时需求灵活调整输出功率，提高电力系统的响应速度与稳定性。这种多输入多输出的协同控制模式能够更有效地抑制电网电压波动，为电力系统提供更加可靠的电压支撑，提升电网的抗扰动能力。

$$P_g = P_{DC1} + P_{DC2} \tag{10}$$

（5）多输入多输出2：当光伏发电量充足且电网发电充足的情况下，所提装置可将光伏电能与电网电能协同利用，通过多端口变流器同时向储能装置进行充电。该模式充分利用了电网与光伏电能，减少了资源浪费。

$$P_{DC1} = P_g + P_{DC2} \tag{11}$$

（6）单输入多输出：当光伏发电量充足时，而电网负荷较重时，通过所提装置的拓扑结构优先将光伏电能并网，而多余的电能可存储至超级电容或蓄电池等储能设备中，形成“分布式发电+储能”的双层储备模式。这种模式在实现并网发电的同时，也为短时功率调节和长时能量存储提供了灵活选择，有效避免了电能浪费。

$$P_{DC2} = P_g + P_{DC1} \tag{12}$$

2 多功能控制策略研究

2.1 并网模式下多功能电能质量治理控制

基于所提的三端口变流器拓扑，本文提出并网模式下多功能电能质量问题治理的控制策略，其核心控制框架如图6所示。该控制策略主要由三层组成，最内环为PWM调制环节，具体已于2.1节中进行阐述；中环为四桥臂三端口变流器基础控制，即实现DC/DC与DC/AC回路的基本功率传输；外环为电能质量治理环节，根据接入电网中存在的电能质量问题，切换其不同的治理功能。

2.1.1 多端口变流器基础控制

为实现对交流电流的精确控制，采用锁相环（Phase Locked Loop，PLL）对电网三相电压进行相位提取，基于此将电压与电流均转换到dq坐标系，得到d轴和q轴电流分量。dq坐标系下，d轴电流主要用于控制有功功率，q轴电流则用于调节无功功率。这种解耦控制方法能够在不同负荷条件下保持系统的稳定性，并提高对电压的快速调节能力。

$$\begin{cases} u_{md}^{*} = -\left(k_{ip} + \dfrac{k_{ii}}{s}\right)\left(i_{sd}^{*} - i_{sd}\right) - \omega L_s i_{sq} + u_{gd} \\ u_{mq}^{*} = -\left(k_{ip} + \dfrac{k_{ii}}{s}\right)\left(i_{sq}^{*} - i_{sq}\right) + \omega L_s i_{sd} + u_{gq} \end{cases} \tag{13}$$

式中，u_{md}^{*}与u_{mq}^{*}分别为工频调制电压d轴与q轴分

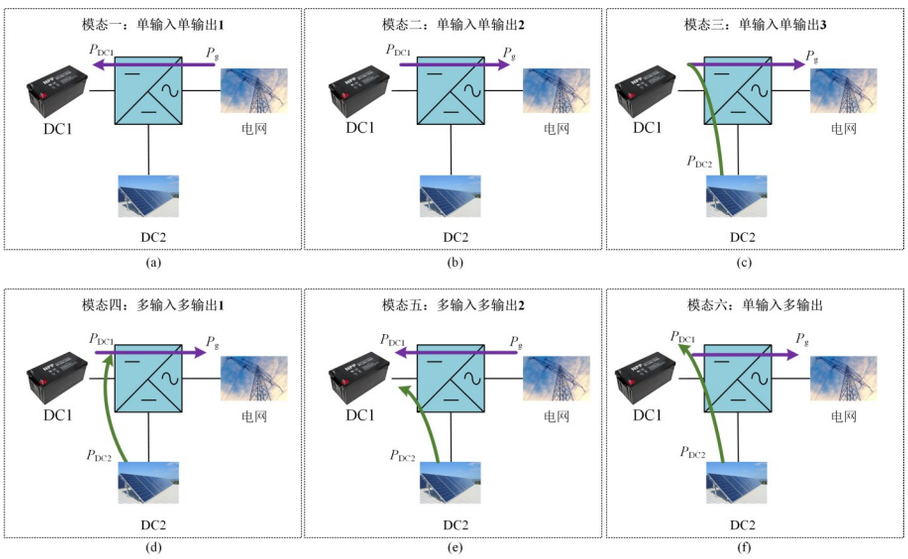


图5 所提拓扑功率流动模式

Fig.5 The power flow of the proposed topology

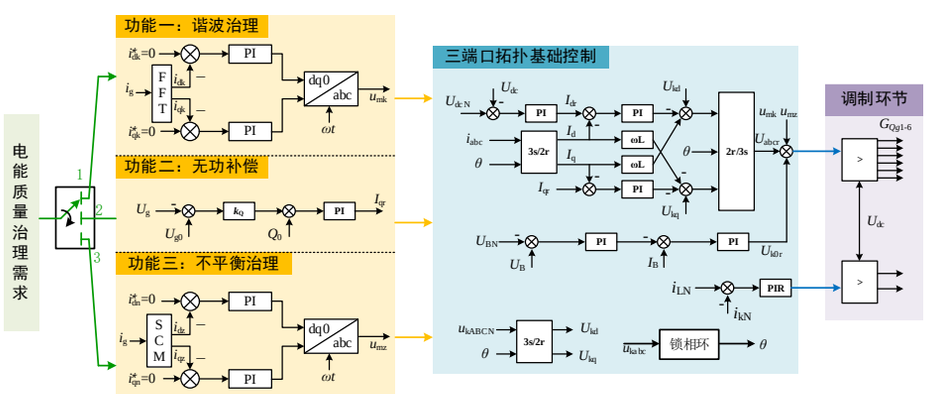


图6 基于所提拓扑的电压治理控制框图

Fig.6 The control diagram for voltage management based on the proposed control

量，i_{sd}与i_{sq}为i_{sabc}经由dq坐标变换得到的变压器副边电流dq分量，k_{ip}与k_{ii}分别为电流环PI控制器的比例与积分控制参数，上标“*”为各个电气量的指令值，ω为电网频率。

上述交流电流控制的电流参考值由直流电压控制环产生，具体用于实现超级电容与蓄电池的协调工作。通过PI控制器调节高压直流端口电压，使超级电容在电网发生频率波动时迅速响应，调节输出的有功功率，缓解电网压力。通过比较低压直流端口的实际电压与参考值，调节蓄电池的充放电功率，确保在日常负荷波动时提供平稳的功率支持。

$$i_{sd}^{*}=-\left(k_{vp}+\frac{k_{vi}}{s}\right)\left(U_{dc}^{*}-U_{dc}\right)+\frac{2U_{dc}i_{dc}}{3U_{g}} \tag{14}$$

式中，k_{vp}与k_{vi}分别为直流电压环PI控制器的比例与积分控制参数。

2.1.2 多类型配电台区电能质量治理控制

配电台区中典型的三种电能质量问题为谐波、三相不平衡与电压越限。

谐波治理控制环节可实时检测台区内电压和电流的谐波含量。为实现谐波治理，首先需对电网电流进行傅里叶分析，获取其频谱特性。其次，对谐波电流进行提取，如公式(15)所示，采用电网电流减去经由低通滤波器获取的基频电流，即可得到电网电流的谐波分量。该模块通过快速生成与谐波相位相反的补偿电流，实现对各次谐波(如5、7次谐波等)的动态滤除，有效降低谐波畸变。

$$i_{dk}=\left(1-G_{LPF}(s)\right)\cdot i_{sd} \tag{15}$$

式中，i_{dk}与i_{qk}为i_{sabc}中的谐波电流dq分量，$G_{LPF}(s)$为低通滤波器传递函数。

将谐波电流dq轴分量的参考值设置为0，采用谐波电流环对谐波电流进行抑制，具体如公式(16)

所示。

$$\begin{cases} u^{*}_{\mathrm{mkd}} = -\left(k_{\mathrm{hp}} + \dfrac{k_{\mathrm{hi}}}{s}\right)\left(i^{*}_{\mathrm{dk}} - i_{\mathrm{dk}}\right) \\ u^{*}_{\mathrm{mkq}} = -\left(k_{\mathrm{hp}} + \dfrac{k_{\mathrm{hi}}}{s}\right)\left(i^{*}_{\mathrm{qk}} - i_{\mathrm{qk}}\right) \end{cases} \tag{16}$$

式中，$u_{\mathrm{mkd}}{}^{*}$与$u_{\mathrm{mkq}}{}^{*}$分别为谐波调制电压d轴与q轴分量，k_{hp}与k_{hi}分别为谐波电流环PI控制器的比例与积分控制参数。

同理，对并网电压的不平衡问题则可采用注入零序电流的形式实现。首先，由公式(3)所示的对称分量法获取不对称运行时的零序电流分量。通过将零序电流参考值设定为0，并经由如公式(17)所示的PI控制器即可即可实现不平衡补偿。

$$\begin{cases} u^{*}_{\mathrm{mnd}} = -\left(k_{\mathrm{zp}} + \dfrac{k_{\mathrm{zi}}}{s}\right)\left(i^{*}_{\mathrm{dn}} - i_{\mathrm{dn}}\right) \\ u^{*}_{\mathrm{mnq}} = -\left(k_{\mathrm{zp}} + \dfrac{k_{\mathrm{zi}}}{s}\right)\left(i^{*}_{\mathrm{qn}} - i_{\mathrm{qn}}\right) \end{cases} \tag{17}$$

式中，$u_{\mathrm{mnd}}{}^{*}$与$u_{\mathrm{mnq}}{}^{*}$分别为零序调制电压d轴与q轴分量，i_{dn}与i_{qn}分别为i_{sabc}中的零序dq分量，k_{zp}与k_{zi}分别为零序电流环PI控制器的比例与积分控制参数。

电压控制环节能够在电压越限(电压过高或过低)时快速响应，通过注入或吸收无功功率来调整电压。本节采用如公式(18)所示的下垂控制方法，将电网电压偏差经由下垂系数获取无功电流参考值，进而在电网电压发生偏差时，实时调节集成型多端口储能变流器的无功功率输出。当电压出现跌落或骤升时，设备能瞬时补偿电压缺口，通过无功调节稳定电压。该功能适合应对工业园区或农村地区因分布式电源并网或负荷波动造成的电压不稳定现象。

$$i^{*}_{\mathrm{sq}} = K_{Q}\left(U_{\mathrm{g0}} - U_{\mathrm{g}}\right) \tag{18}$$

式中，K_{Q}为下垂系数，U_{g0}为电网额定电压。

2.2 孤岛模式下控制策略

当电网馈线发生断线故障时，配电台区无法对负载进行供电，此时，图1所示的台区集成型多端口储能变流器拓扑中的变压器原边绕组可视为开路，而N_2、N_3与N_4绕组满足如图7所示的连接关系，其中，图7将交流侧以单线形式绘出。根据图7所示的等效电路图，当电网馈线断线时，台区集成型多端口变流器将蓄电池与超级电容中的电能进行释放，以向负载进行短时供电。

由公式(1)所满足的匝数关系，N_2、N_3与N_4绕组形成一台等效的自耦变压器，对储能变流器端口电压进行升压。该自耦变压器可使储能变流器的交流端口输出电压较低，进而增大了变流器的调制裕度，并在极限情况下可延长储能变流器的供电时间。

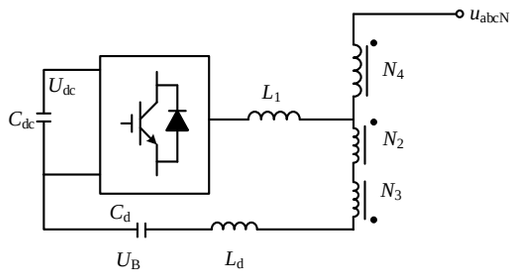


图7 孤岛模式等效电路图

Fig.7 Equivalent circuit of the island operating mode

相较于并网模式下相位由锁相环提供，孤岛运行模式下交流侧端口输出电压幅值与频率则无法通过锁相获取。因而，孤岛运行模式下的控制则需在原有控制环中进行修改，具体控制框图如图8所示。

3 仿真验证

3.1 仿真条件

运用MATLAB/Simulink仿真实验平台对本发明所提方案进行验证，仿真模型按照图1进行搭建，分别讨论所提拓扑的基础运行功能与电能质量治理功能。仿真过程如下，电力电子台区原边接入10kV线电压的交流电网，副边接入阻感性负载；四桥臂变流器高压直流端口直流电压设定为750V。

3.2 拓扑基本功能验证

仿真中，0.02s前装置进行锁相，0.02s后装置运行，储能不输出功率；1s后储能开始进行功率输出。电力电子台区装置副边电压与电流输出波形如图9、并联端电压与电流输出波形如图10、原边电压与电流输出波形如图11所示以及负载N相电流、变流器N相电流与变压器中性点N相电流输出波形如图12所示。

图9中在整个运行过程，由于负载固定，负载流过固定的三相电流i_{Labc}，可以发现负载的严重不平衡导致电流严重不平衡。

图10中在0.02s前，变压器由于不平衡负载的原因流过大量不平衡电流，在0.02s后装置运行后变流器对线路不平衡电流进行了治理，流经变压器的不平衡电流迅速减小，在1s后储能开始充电，线路电流变大。这些说明变流器对线路电流进行了不平衡治理，并且蓄电池能够随时快速变化的光伏

功率,体现其优越性。

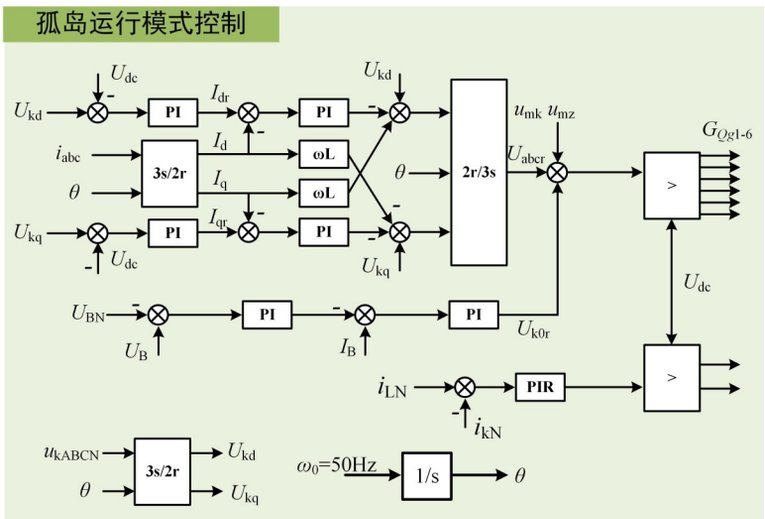


图 8 孤岛模式控制框图

Fig.8 Control diagram of the island operating mode

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation Parameters

参数	数值
设备容量 S_N	50kVA
一次侧电压 U_g	10kV
二次侧电压 U_g	380V
LC 滤波器 C_f, L_f	10μF, 2.3mH
开关频率 f_{sw}	10kHz

图 11 中在 0.02s 前,变压器由于不平衡负载的原因流过大量不平衡电流,原边流过大部分不平衡电流,在 0.02s 后装置运行后变流器对线路不平衡电流进行了治理,流经变压器的不平衡电流迅速减小,在 1s 后储能开始充电,线路电流变大。

图 12 中在 0.02s 前变压器 N 相线路流过大量零序电流,在装置启动后,零序电流迅速得到补偿,并从 50A 降至 2A 以内。在 0.02-2s 变化过程中,有功功率变化平滑,稳态下输出稳定,体现了装置在多储能并网功率灵活调控的优越性。

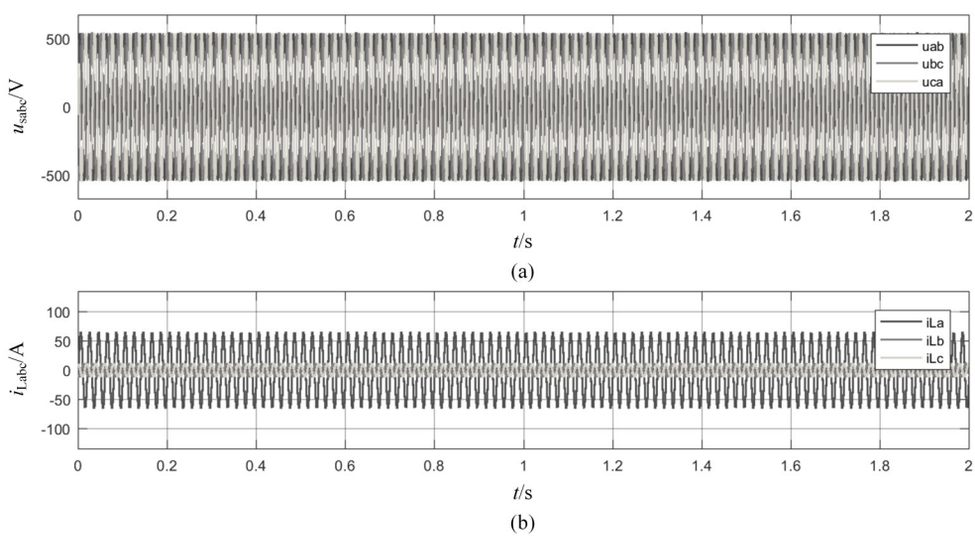


图 9 (a)副边电压 (b)电流仿真波形

Fig.9 (a) Secondary-side voltage (b)current waveform

3.3 所提拓扑电能质量治理仿真验证

本文提出的储能集成型电力电子台区装置及其控制方法具备电能质量治理的效果。本节对其电能质量治理效果进行验证。

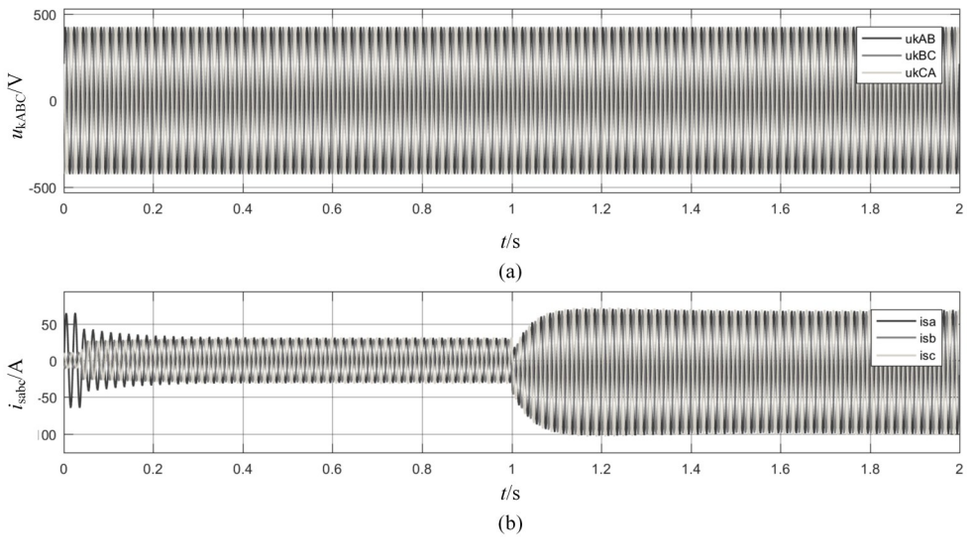


图 10　(a)并联端电压 (b)曲折绕组电流仿真波形

Fig.10　(a) Parallel terminal voltage (b) Simulated current waveform of the zigzag winding

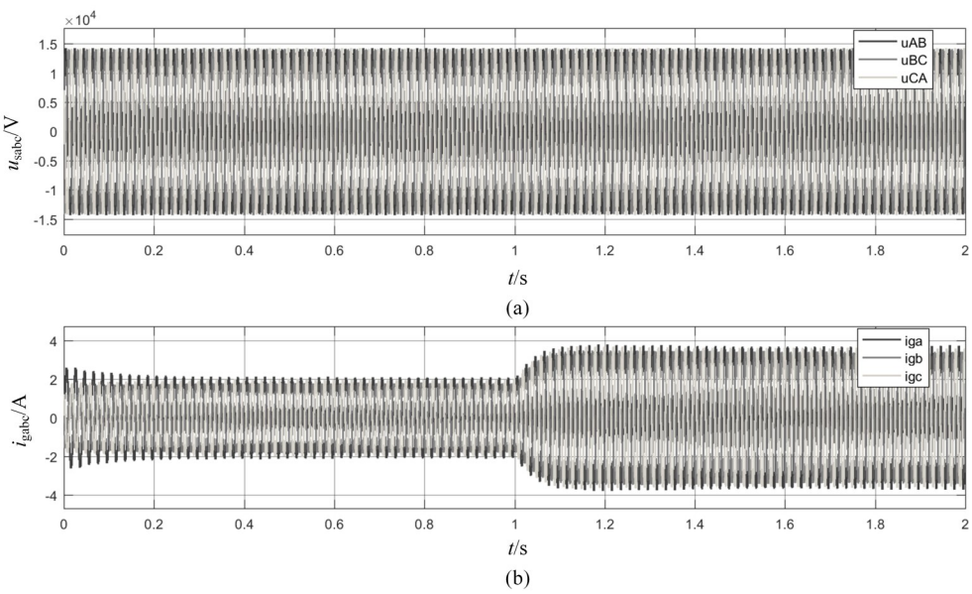


图 11　(a)原边电压 (b)电流仿真波形

Fig.11　(a) Primary-side voltage (b) Simulated current waveform

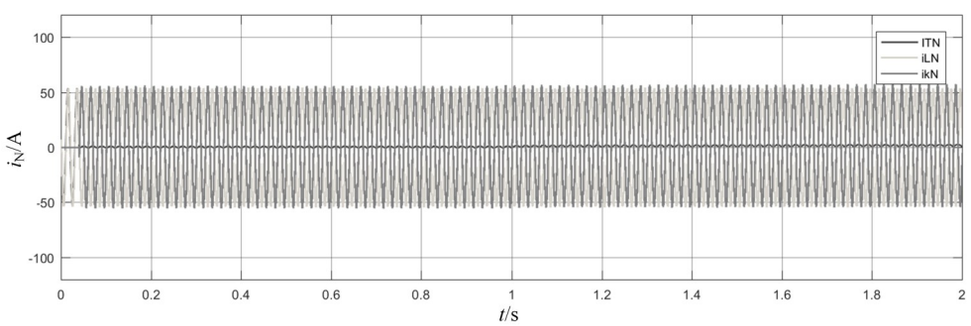


图 12　零序回路补偿波形

Fig.12　Zero-sequence loop compensation waveform

图13分别展示了未加入电能质量治理控制与加入电能质量治理控制在切除负载时的仿真波形。如图13(a)所示,当未采用电能质量治理控制时,0.2s切除负载后,电网电压显著上升,由311V上升至340V。产生这一现象的原因是切除负载后,功率不平衡所产生的电流在线路阻抗上形成的电压与切除负载前不一致,而未加治理控制时,变流器维持恒功率输出,进而导致并网电压升高。相较之,图13(b)中,切除负载后,由于电能质量治理控制对变流器输出的有功功率与无功功率进行调节,进而仅在切除后的一小段时间内产生了些微的电压抬升,最大上升电压为320V,并最后恢复至切除负载前的电压幅值311V。

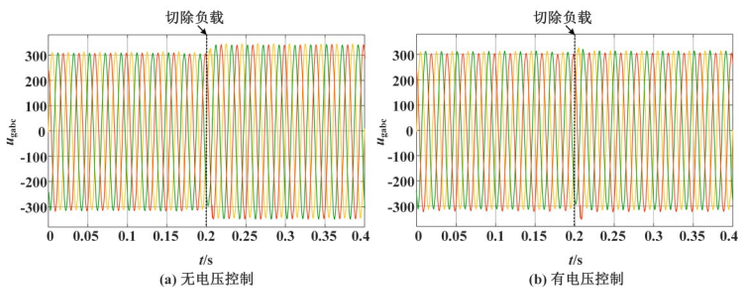


图13 无功补偿仿真波形

Fig.13 Reactive power compensation simulation wavefor

当配电网中存在较多的非线性负载时,网侧电流i_{ga}波形中存在显著的谐波,如图14所示。由于非线性负载的接入,导致网侧电流中存在较大的谐波畸变,其总谐波畸变率为13.12%,远超出配电网电能质量规范指标。

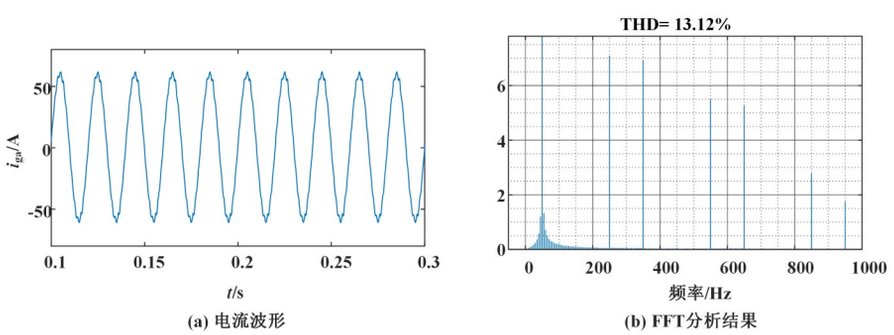


图14 谐波补偿前电波形

Fig.14 Grid-side current without compensation

图15为采用所提拓扑对配电网谐波进行治理后的仿真结果。网侧电流i_{ga}波形中谐波含量显著减少,总谐波畸变率由13.12%降低为2.30%,表明了所提拓扑与控制在谐波治理方面的有效性。

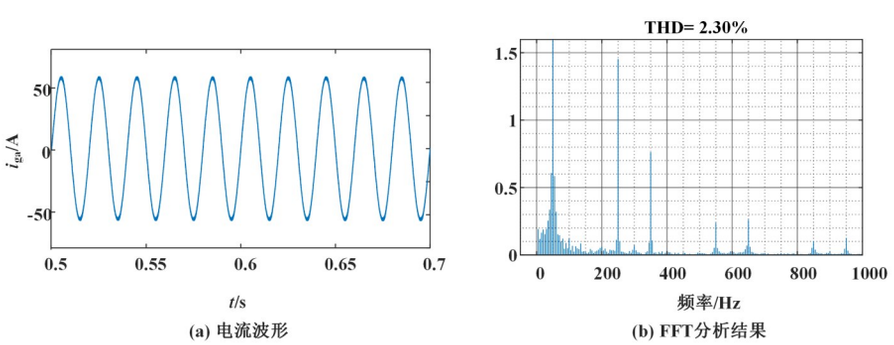


图15 谐波补偿后电波形

Fig.15 Grid-side current with compensation

4 结论

本文提出的台区集成型多端口储能变流器拓扑及其控制方法,结论如下:

(1)所提拓扑对现有电力电子化配电台区设备进行复用,有效减少开关器件数量。

(2)通过超级电容与蓄电池储能设备联合调控,有效提升电网电压调节能力,并提升了系统的可靠性与经济型。

(3)本文分别针对多端口储能变流器的并网模式与孤岛运行模式提出相应的控制策略。仿真结果表明,所提拓扑与控制在应对电网电压波动时,能够迅速响应并实现无功功率调节,展现出良好的电能质量改善效果。

参考文献:

[1] 张勇军,羿应棋,李立浧,等.双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J].电力系统自动化,2022,46(22):1-12.
Zhang Y J, Yi Y Q, Li L C, et al. Prospect of new low voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. Automation of electric power systems,2022,46(22):1- 12.

[2] 丁明,胡迪,毕锐,等.含高渗透率可再生能源的配电网可靠性分析[J].太阳能学报,2020,41(2):194-202.
Ding M, Hu D, Bi R, et al. Reliability analysis of distribution system containing high penetration renewable energy[J]. Acta energiae solaris sinica, 2020, 41(2): 194-202.

[3] Chandra Mouli G R, Bauer P, Wijekoon T, et al. Design of A Power-Electronic-Assisted OLTC For Grid Voltage Regulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015,30(3):1086-1095.

[4] 姜淞瀚,彭克,徐丙垠,等.直流配电系统示范工程现状与展望[J].电力自动化设备,2021,41(5):219-231.
Jiang Songhan, Peng Ke, Xu Bingyin, Et Al. Current Situation And Prospect Of Demonstration Projects Of DC Distribution System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 219-231.

[5] 朱禹澜,廖凯,杨健维,等.含多电力电子变压器的交直流混合配电网潮流计算方法[J/OL].电网技术,1-10[2024-10-29]. https://doi. org/10.13335/j. 1000-3673.pst.2024.0550.
Zhu Yulan, Liao Kai, Yang Jianwei, et al. Power Flow Calculation Method for AC/DC Hybrid Distribution Network with Multiple Power Electronic Transformers [J]. Power System Technology, 1-10[2024-10-29]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0550.

[6] 季振东,王亚祥,李东野,等.电力电子变压器参与配电网调压调频的应用研究[J].太阳能学报,2024,45(06):182-190.
Ji Zhendong, Wang Yaxiang, Li Dongye, et al. Application Research of Power Electronic Transformers in Frequency/Voltage Regulation of Distribution Networks [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(06): 182-190.

[7] 郑涛,郭勇帆,吕文轩,等.基于电力电子变压器故障穿越策略的低压直流配电网保护[J].电力系统自动化,2023,47(16):152-161.
Zheng Tao, Guo Yongfan, Lyu Wenxuan , et al. Protection for Low-voltage DC Distribution Network Based on Fault Ride-through Strategy of Power Electronic Transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16):152-161.

[8] 肖峻,王莹,祖国强.电力电子化配电网的柔性度[J].电力系统自动化,2023,47(06):30-39.
Xiao Jun, Wang Ying, Zu Guoqiang. Flexibility Degree for Power-electronized Distribution Network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(06): 30-39.

[9] 简玉婕,郭谋发,游建章.含电力电子变压器的配电网单相接地故障集成化消弧方法[J].电力自动化设备,2022,42(05):125-134.
Jian Yujie, Guo Moufa, You Jianzhang. Integrated arc suppression method of single-phase grounding fault in distribution network with power electronic transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(05):125-134.

[10] 张涛,穆云飞,贾宏杰,等.含电力电子变压器的交直流配电网随机运行优化[J].电网技术,2022,46(03):860-869.
Zhang Tao, Mu Yunfei, Jia Hongjie, et al. Stochastic Operation Optimization for AC/DC Distribution Network With Power Electronic Transformer [J]. Power System Technology,2022,46(03):860-869.

[11] 林霖,裴忠晨,蔡国伟,等.基于电力电子变压器的中压直流互联配电网协调控制方法[J].电力系统自动化,2021,45(08):51-59.
Lin Lin, Pei Zhongchen, Cai Guowei, et al. Coordinated Control Method for Medium-voltage DC Interconnected Distribution Network Based on Power Electronic Transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45(08):51-59.

[12] Zhuo Chaoran, Zhang Xiaotian, Zhang Xiong, et al. Short-circuit fault current limiting control method of DC transformer with separable supporting capacitor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,

37(2): 424-432.

[13] Chen L, Ding M, Chen H K, et al. Study on Resistive SFCL For Fault Ride-Through Fulfillment of Power Electronic Transformer Interconnecting MV And LV Power Systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31 (8): 1-6.

[14] 彭珉轩,孙建军,郭佳雪,等.一种复合三端口AC/DC/DC光储并网变换器[J].中国电机工程学报,2023,43(17):6776-6786.
Peng Minxuan, Sun Jianjun, Guo Jiaxue, et al. A Kind of Composite Three-port AC/DC/DC Grid-connected Converter With PV and BESS [J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(17):6776-6786.

[15] 李树鹏,李振斌,刘亚丽,等.支撑微电网和配电网灵活潮流调节的电流源型多端口互联变流器控制技术[J/OL].电源学报,1-13[2024-10-30]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240724.1136.002.html.
Li Shupeng, Li Zhenbin, Liu Yali, et al. A current-source multi-port interconnected converter control technology that supports flexible power flow regulation in microgrids and distribution networks [J/OL]. Journal of Power Supply,1-13[2024-10-30].

[16] 陈阳,王晗,朱淼,等.基于混合子模块与全桥臂电感的三端口模块化多电平变流器:简化建模与电网互联控制策略[J].中国电机工程学报,2022,42(05):1641-1657.
Chen Yang, Wang Han, Zhu Miao, et al. Three-port MMC With Hybrid Submodules and Full Arm Inductor Scheme: Simplified Modeling and Grid Interconnection Control Strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(05):1641-1657.

[17] 宋鑫,肖建国,牛洁茹,等.一种用于新能源混合发电的移相控制三端口DC-DC变流器[J].电工技术学报,2015,30(17):36-44.
Song Xin, Xiao Jianguo, Niu Jieru, et al. A Three-port DC-DC Converter with Phase Shift Control for the Hybrid Renewable Energy Generation System [J]. Transactions Of China Electrotechnical Society,2015,30(17): 36-44.

[18] N. Peng , Y. Yuan , Y. Huang , T. Tao and W. Liu , "A Boost-LC Resonance Multimode DC - DC Converter for EV Charger Application, " IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 10, no. 1, pp. 901-910, March 2024.