

基于模块组合式LLC谐振变换器的直流配电网研究

相比于传统交流配电网,直流配电网在线路成本、输电损耗和供电可靠性等方面具有较强优势,并且更加适合分布式电源和负载的接入。首先根据具有可再生能源接入的典型应用场景,设计了一种具有高、中和低电压等级的环状直流配电网拓扑,给出了应用于不同直流电网间直流互联设备拓扑方案——模块组合式LLC谐振变换器,包括输入串联输出串联(Input-Series Output-Series, ISOS)结构、输入并联输出串联(Input-Parallel Output-Series, IPOS)结构以及输入串联输出并联(Input-Series Output-Parallel, ISOP)结构。在此基础上,提出了模块组合式LLC谐振变换器的基本控制策略,并结合直流配电网多源和多负荷特性,提出了一种基于下垂控制的直流配电网多源协调控制策略,实现直流电压稳定控制和功率灵活分配。搭建了直流配电网的仿真模型,仿真结果验证了所提出直流配电网设计方案及控制策略的有效性和可行性。

吴 鸣¹ 宋振浩¹ 洪 婴² 张 海¹ 郑 楠¹/1.中国电力科学研究院有限公司 2.北京交通大学电气工程学院

0 引言

在环境污染和化石能源短缺的双重危机下,可再生能源受到了广泛关注,未来能源格局将发生深刻变化。然而,风电、太阳能等可再生能源都具有间歇性、随机性和波动性的特点,传统的交流电力系统在可再生能源大量接入时面临着诸多问题,新的能源格局需要新的技术、装备和电网结构^[1]。随着电力电子技术和功率半导体的发展,高压直流输电技术的成熟,低压直流微电网的实践以及直流供电技术缺点的攻克,更可靠、更高效、更环保且更经济的直流配

电网在某些领域重新取得了优势^[2-6]。

目前国内外关于直流配电系统的研究还处于试验探索阶段。关于直流配电网的研究中,其换流器多采用电压源型换流器,而文献[7]指出未来直流配电网的发展方向应该是多级配电网的相互配合和补充,并给出了基于电子电力变压器的多级直流配电网构想。该直流配电网由高、中和低三种电压等级直流网相互配合,不仅能够满足电能输送和分配要求还允许用户侧小型分布式电源和大型新能源发电接入,显然电压源型换流器无法作为不同电压等级直流电网间的接口变换器。

直流互联设备作为多级直流配电网间的接口变换器,是未来直流配电网建设的有力支撑与保障。不同电压等级直流母线间的电压变换不能像交流系统一样利用电磁感应原理实现,必须基于电力电子技术利用功率变换器实现电压的变换以实现能量的传递^[8-9]。全桥LLC谐振型DC/DC变换器由于具有功率密度高、软开关性能好以及效率高等优点,被广泛应用于需要进行直流变换的场合^[3]。基于器件耐压考虑,在中高压大功率场合,可通过模块串并联组合以减小电压电流应力^[10]。

直流配电系统稳定运行的关键在于直流电压的稳定,其控制目标是利用合理的协调控制机制,有效地协调直流配电系统中源与负载之间的功率交换,使得直流电压稳定在一定范围内^[11]。直流母线电压控制的研究已经相当成熟,常



吴 鸣/高级工程师

关键词/Keywords

直流配电网·
模块组合·
LLC谐振变换器·
功率均衡·
下垂控制·

国家电网公司科技项目“柔性直流配电控制策略与主动保护机理研究”(EPRI PKJ[2016]2252)。

用的控制方法有主从控制^[12]、电压裕度控制^[13]以及电压下垂控制^[14-16]等,但都是基于电压源型换流器进行阐述的,并不适合由直流互联设备构成的多级直流网络组成的直流配电系统。

本文针对集结可再生能源发电单元为居民区、工业园区以及地铁牵引系统供电的典型应用场景,设计了具有高、中和低三种直流电压等级的直流配电网拓扑结构,该拓扑能够实现可再生能源高效并网并为负载可靠供电。采用具有高功率密度、易于实现软开关的LLC谐振变换器作为标准DC/DC模块,研究了适合高、中和低三种直流母线电压等级直流母线间接口变换器以及可再生能源并网接口变换器的串并联组合形式,并给出了相应的基本控制策略。结合直流配电网多源和多负荷特性,基于直流互联设备,详细分析了基于直流电压下垂控制的多源协调控制策略。最后,搭建直流配电网的仿真模型,验证了提出直流配电网设计方案及控制策略的有效性和可行性。

1 直流配电网的结构

1.1 系统总体拓扑结构

构建直流配电网需要发挥直流配电的优势特长,不同的应用场景需要不同的网架拓扑与运行模式,还需要与之相适应的直流配电设备配置,这些是推动直流配电网体系建立的基础。在确定应用场景下,首先确定该应用场景下的电气组成,其次明确该模式的主要技术需求,最后确定网络结构。

本文所设计的应用场景为集结可再生能源发电单元为工业园区、居民区以及直流负载集中区(地铁牵引供电系统)供电的直流配电网。在该应用场景下,电气组成主要是大规模可再生能源发电单元,负荷供电可靠性要求高且负荷功率大的工业园区,中压直流负载和低压直流负载以及高压交流或直流输电网。该模式下的主要技术需求是通过直流配电网实现新能源发电的高效并网、就地消纳以及远距离输送,充分发挥直流配电网供电可靠性强、供电能力强的优势,保证大功率重

要负荷的高可靠性供电。因此,直流配电网中压直流母线采用环形结构以便多点电源的接入,而中压电压等级可以采用 ± 10 kV,该电压等级可以作为大型分布式电源的并网接口,进一步提高系统效率。通过合理设置低压直流电压等级,尽可能对低压直流负载实现母线电压直供。低压直流母线电压采用 ± 750 V,此电压等级的主要任务是为轨道交通、小型分布式能源提供合理的接口,是微网与大电网经济稳定连接的核心电压等级,同时也为大部分家用负荷供电(仅需一级变换)。由于直流线路本身可靠性相对较高,并从经济性出发,可采用低压放射型网络配电至各负荷。

综上,可设计直流配电系统如图1所示。

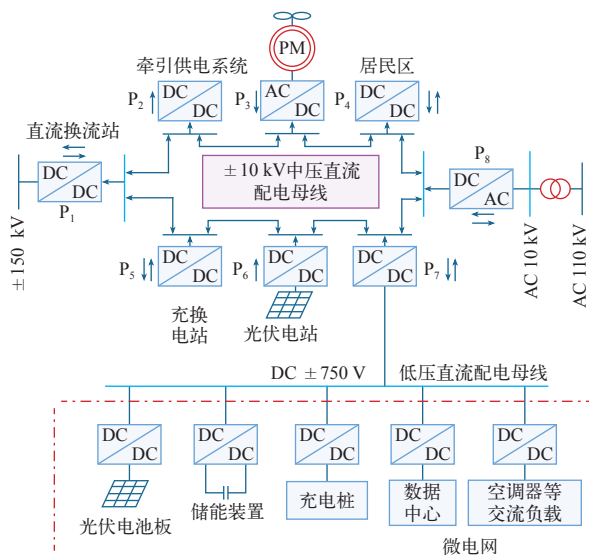


图1 直流配电网拓扑结构

1.2 直流互联设备

直流配电网的关键设备是直流配电网的有力支撑与保障,在现代直流配电网的建设中,需要对如直流变压器、大功率AC/DC变换器及直流断路器等关键设备进行研究开发。本文主要研究的是不同电压等级的直流互联设备,如图1中的 P_1 、 P_2 、 P_4 、 P_5 、 P_6 与 P_7 。

1.2.1 模块组合式结构

将多个标准化DC/DC变换器模块的输入和输出分别串联或并联,可以得到多模块串并联组合系统^[11]。

由图1所示的各直流互联设备的输入输出电压等级集中在高压输入中压输出（P₁）、低压输入中压输出（P₆）和中压输入低压输出（P₂、P₄、P₅和P₇）三种类型。因此，分别选择如图2所示的ISOS结构、IPOS结构和ISOP结构来减小单个模块的电压电流应力和功率等级。

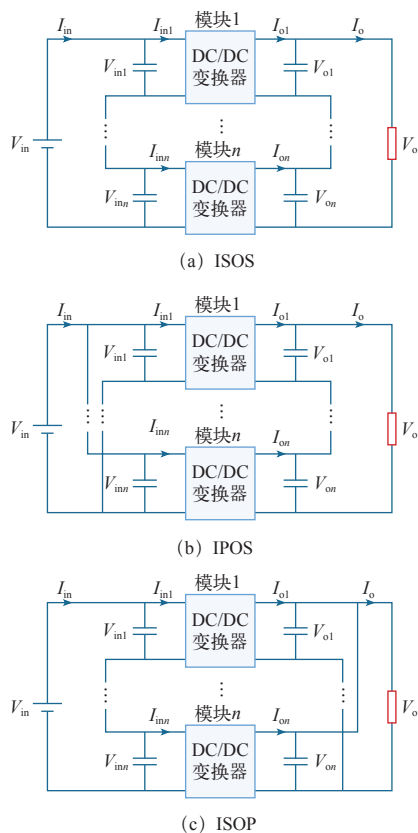


图2 串并联组合结构

ISOS、IPOS和ISOP系统分别适用于高压输入高压输出（P₁），低压输入中压输出（P₆），中压输入低压输出场合（P₂、P₄、P₅和P₇）。

1.2.2 LLC谐振变换器小信号建模

本文中选取如图3所示的双全桥LLC谐振变换器作为直流互联设备的DC/DC模块。

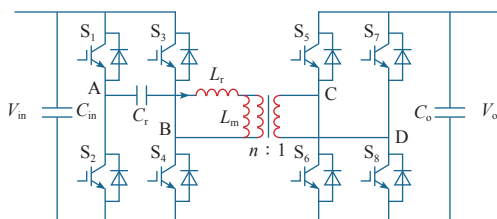


图3 LLC谐振变换器电路原理图

LLC谐振变换器通常采用变频控制方式，工作在谐振频率点时效率最高，因此设计时使其工作在谐振频率点附近，此时，谐振电流波形近似正弦，可以采用基波等效法进行分析。

可以得到输入电压到输出电压的传递函数为

$$H(s) = \frac{nV_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{s^2 L_m C_r R_{eq}}{s^3 L_m L_r C_r + s^2 (L_r + L_m) C_r R_{eq} + s L_m + R_{eq}} \quad (1)$$

式中， R_{eq} 为耦合到一次侧的等效交流负载； n 为变压器电压比。

可得到电压增益

$$H(k, Q, f_n) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \frac{1}{k} \left(1 - \frac{1}{f_n^2}\right)\right]^2 + \left(f_n - \frac{1}{f_n^2}\right)^2 Q^2}} \quad (2)$$

式中，电感系数 $k = L_m/L_r$ ；品质因数 $Q = \sqrt{L_r/C_r}/R_{eq}$ ；归一化频率 $f_n = f_s/f_r$ 。

开关频率到输出电压的传递函数可以由三阶多项式近似

$$G_{vf}(s) \approx \frac{K_{vf} \left(1 + \frac{s}{\omega_2}\right)}{\left(1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_1}\right)} \quad (3)$$

式中， K_{vf} 为工作点处电压增益曲线的斜率； ω_0 为稳态工作点开关频率； $\omega_1 \approx 1/R_o C_o$ ； $\omega_2 \approx 1/r_o C_o$ 。

式（2）可以指导LLC谐振网络的参数设计。

对于单个LLC谐振变换器，式（3）足以指导单电压闭环系统控制系统的设计，而对于组合式LLC谐振变换器，还需要进行输入均压或者输出均压控制以满足模块功率均衡需求，因此需要根据式（1）所示的输入电压到输出电压间的小信号传递函数来指导功率均衡控制器的设计^[17-18]。

2 直流配电网的控制

直流配电网的控制可大致分为配网级、微网级和单元级三个层次，分别对应多端多电压等级的运行控制、多源协调控制和电力电子变换器的基本控制，本文提出的控制策略主要涉及多源协调控制和电力电子变换器的基本控制。在直流

配电网中，由于供电电源种类繁多且可控程度不同，因此系统存在多种运行状态。为保证各单元正常工作，各变换器需要对自身的电压、电流或功率进行控制。同时，为维持母线电压稳定和系统功率的平衡，需要根据直流配电网的不同工作状态，向各变换器分配母线控制任务。

2.1 直流互联设备的基本控制

根据不同的系统控制目标和系统级控制方法，单元级设备的控制策略有电压控制策略和功率调节控制策略。对于模块组合式结构而言，不仅需要保证其输出电压或传输功率满足要求，还应当保证各模块间功率均衡。

由文献[10]可以得到，本文所要研究的ISOS结构、IPOS结构以及ISOP结构均可以通过控制串联端端口电压相等实现各模块的功率均衡控制，结合输出电压与开关频率的关系，直流电压控制策略框图如图4所示。

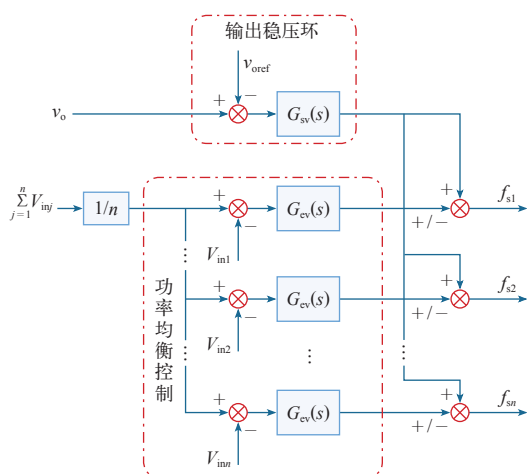


图4 组合式LLC谐振变换器控制策略框图

该控制策略分为两部分：输出均压环稳定直流电压；功率均衡控制则实现各模块的功率均衡。采集输出电压并和参考值进行比较，再经电压控制器调节后输出基础开关频率，此输出量与功率平衡控制器所得到的平衡矫正量叠加后，输出各单元最终的开关频率，从而实现对输出电压和各模块输出功率的控制。对于不同组合形式的变换器，功率均衡控制器的输入量不同。在本文中，ISOS结构和ISOP结构选择输入电压平均值与

每个模块输入电压的差值作为功率均衡控制器的输入；IPOS结构的功率均衡控制器的输入则选择输出电压的平均值与每个模块输出电压的差值。由于LLC谐振变换器的输入电压随开关频率的增加而增加，输出电压随开关频率的增加而减小。因此，对于如图4所示的+/-，前者适用于输入均压控制，后者适用于输出均压控制。

功率调节控制策略与直流电压控制策略类似，唯一的差别在于其基础开关频率由输出功率与功率参考的差值经过功率调节器获得。

对于无功功率反向需求的如光伏电站（P₆）、居民区（P₄）和城轨供电系统（P₂），LLC谐振变换器的二次侧全桥可以采用二极管整流桥，采用不控整流的形式；对于有功功率反向流动的场所如直流主网（P₁）、充换电站（P₅）和工业园区的微电网（P₇），一、二次侧全桥都应为有源桥，实现能量双向流动。

2.2 直流配电网多源协调控制策略

下垂控制是直流配电网中多点电压控制方式的主要形式，能够保证随着并联换流站数目不断增加，直流配电网系统仍能维持稳定运行。在直流电压的正常运行区间内，直流配电网中的各端换流站利用各自的有功功率或电流与直流电压的斜率特性，实时快速地响应功率波动，从而实现直流电压稳定和功率平衡。依旧以三端直流配电网为例，基于U-I特性曲线的直流电压下垂控制，其控制特性及控制策略框图如图5所示。

由U-I特性曲线可以得到直流电压U_{dc}与直流

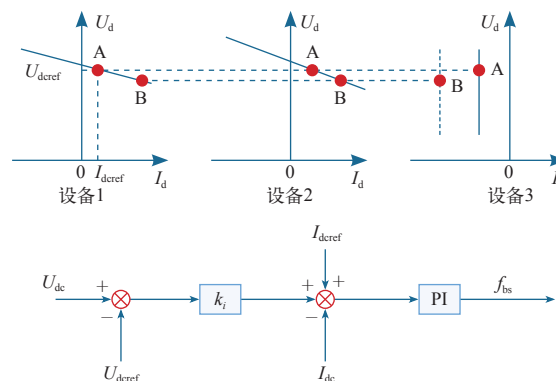


图5 直流电压下垂控制U-I特性曲线及控制策略框图

电流 I_{dc} 关系

$$U_{dc} = U_{dref} + \frac{1}{k_i}(I_{dref} - I_{dc}) \quad (4)$$

式中, k_i 为 $U-I$ 的下垂系数。

系统初始工作点为A, 源设备1和源设备2同时给负载设备3供电, 将输出电压稳定在直流电压参考值处; 当负载设备3功率需求增大, 此时, 设备1和2继续运行于点A将无法提供负载设备3所需的功率。由于设备1和设备2的电压下降特性减小电压时能够增大输出功率, 在二者的协调下, 最终实现系统功率平衡。

3 仿真实验

3.1 仿真模型

如图1所示的直流配电网中, 按照供电电源进行分类, 系统运行模式有15种。本文仅选择典型三端混合供电模式进行展示, 三端供电电源分别为交流主网、直流主网和光伏电站, 负载为3个5 MW的ISOP组合式 LLC 谐振变换器。为简便起见, 每个设备均采用两个模块进行组合。交流主网和直流主网采用直流电压下垂控制策略, 光伏电站采用定功率控制。

3.2 仿真分析

前2 s交流主网和直流主网均供电5 MW, 光伏电站功率参考值为5 MW; 第3 s时光伏电站输出功率减小, 功率参考值为3 MW。仿真结果如下所述。

图6为直流配电网中三种模块组合式 LLC 谐振变换器各单元串联端的电压波形。为验证电力电子变换器的基本控制中功率均衡控制策略的有效性, 仿真时同一设备的两个单元的谐振电感值有10%的差异。由图6可知, ISOS组合式设备和ISOP组合式设备均实现了输入均压, 而IPOS组合式设备实现了输出均压, 表现出了较好的电压平衡效果。

图7为直流配电网的稳态运行特性, 由图7a可以看到在直流电压下垂控制策略的作用下, 直流电压稳定在20 kV, 中压直流母线电压由交流主网和直流主网设备共同控制。由图7b中光伏设备输

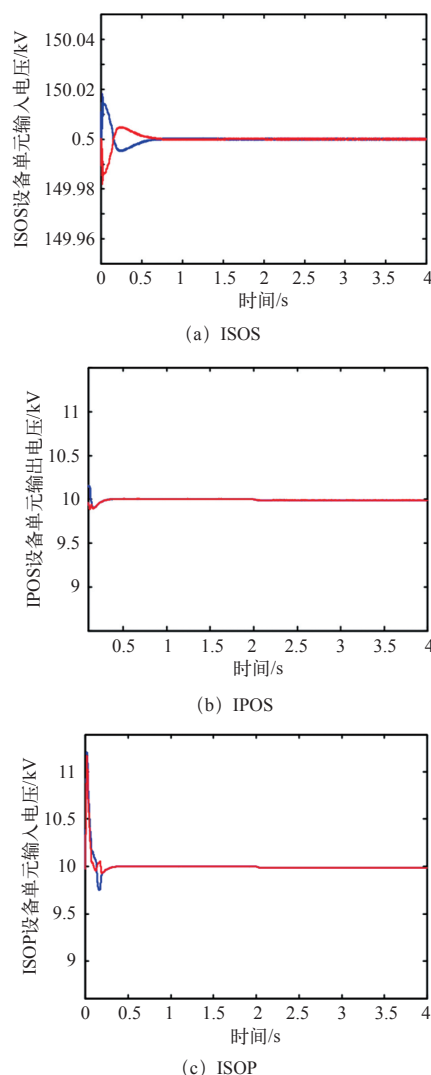


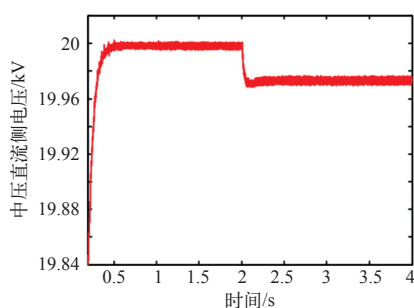
图6 设备两单元输入或输出电压波形

输出功率值在稳态时均与功率参考值一致, 证明了IPOS组合式 LLC 谐振变换器的功率控制策略的有效性。同时, 在下垂控制策略的作用下, 交流主网和直流主网各自按照给定值输出功率均为5.06 MW。第2 s时, 光伏电站由于出力不足, 输出功率降为3 MW。而负载功率需求依旧为15 MW, 交流主网和直流主网运行平衡点右移, 输出电压略有减小, 为19 973 V, 输出功率在下垂控制下自动分配, 均为6.08 MW。

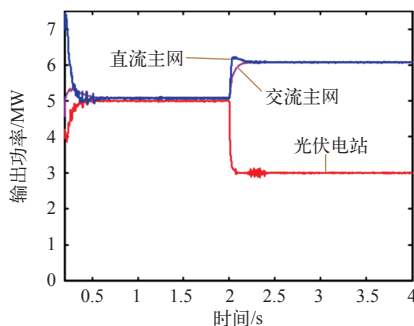
4 结束语

本文针对可再生能源高效并网应用场景, 结合直流配电网的关键技术完成了以下工作。

1) 针对集结可再生能源发电的典型应用场



(a) 中压直流侧输出电压



(b) 各源设备输出功率

图7 直流配电网稳态运行特性

景,给出了一种具有高、中和低三种电压等级的环状配电网结构。

2) 针对该直流配电网结构,设计了三种模块组合式结构作为不同电压等级直流母线间的接口变换器。

3) 以LLC谐振变换器作为基本模块,给出了不同组合形式的变换器的基本控制策略和基于该模块组合式直流互联设备的直流电压下垂控制策略。

参考文献

- [1] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (13): 7-12.
- [2] Boroyevich D, Cvetkovic I, Dong D, et al. Future electronic power distribution systems: a contemplative view [C]. International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, Romania: IEEE, 2010: 1369-1380.
- [3] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) system: the energy Internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99 (1): 133-

148.

- [4] Ito Y, Zhong Q Y, Akagi H. DC microgrid based distribution power generation system [C]. International Power Electronics and Motion Control Conference, Xi'an, China, IEEE, 2004: 1740-1745.
- [5] Yamashita T, Muroyama S, Furubo S, et al. 270 V DC system-a highly efficient and reliable power supply system for both telecom and datacom systems [C]. International Telecommunication Energy Conference, Copenhagen, Kongeriget Danmark, IEEE, 1999: 1-3.
- [6] Momoh J A, Kaddah S S, Salawu W. Security assessment of DC zonal naval-ship power system [C]. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Halifax, United Kingdom, IEEE, 2001: 206-212.
- [7] 王丹, 毛承雄, 陆继明, 等. 直流配电系统技术分析 & 设计构想 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (8): 82-88.
- [8] Pereda J, Dixon J. High-frequency link: a solution for using only one DC source in asymmetric cascaded multilevel inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (9): 3884-3892.
- [9] Alex H, Mariesa L C, Gerald T H, et al. The future renewable electric energy delivery and management system: the energy internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99 (1): 133-148.
- [10] 陈武, 阮新波, 颜红. DC/DC多模块串并联组合系统控制策略 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (7): 93-102.
- [11] 孙鹏飞, 贺春光, 邵华, 等. 直流配电网研究现状 & 发展 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36 (6): 64-73.
- [12] 徐政. 柔性直流输电系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 128-130.
- [13] 唐庚, 徐政, 薛英林, 等. 基于模块化多电平换流器的多端柔性直流输电控制系统设计 [J]. 高压技术, 2013, 39 (11): 2773-2782.

- [14] Chaudhuri N R, Chaudhuri B. Adaptive droop control for effective power sharing in Multi-Terminal DC (MTDC) grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28 (1) : 21-29.
- [15] Pinto R T, Bauer P, Rodrigues S F, et al. A novel distributed direct voltage control strategy for grid integration of offshore wind energy systems through MTDC network [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (6) : 2429-2441.
- [16] Kumars R, Arash M, Jose I C, et al. A generalized voltage droop strategy for control of multi-terminal DC grids [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51 (1) : 607-618.
- [17] 张捷频, 刘建强, 杨景熙, 等. 输入串联输出并联变换器的控制器设计及稳定性分析方法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32 (17) : 180-188.
- [18] 胡福年, 葛苗苗, 张访, 等. 分布式电源接入配电网的多目标优化控制 [J]. 电气工程学报, 2016, 11 (3) : 41-46.
- (收稿日期: 2017-12-26) **EA**

(上接第18页)

- [6] 孙曙光, 王景荃, 师顺泉. 单相电路谐波及无功电流实时检测的研究 [J]. 电测与仪表, 2008, 45 (1) : 4-7.
- [7] 葛玉敏, 李宝英, 邢砾云. 基于瞬时无功功率理论的单相电路谐波电流检测方法的研究 [J]. 电网技术, 2006 (增刊) : 225-229.
- [8] 耿云玲, 王群. 单相电路的一种谐波和无功电流实时检测方法 [J]. 国防科技大学学报, 2000 (4) : 111-115.
- [9] 戴瑜兴, 张义兵, 陈际达. 检测单相系统谐波电流和无功电流的一种新方法 [J]. 电工技术学报, 2004 (2) : 19, 93-97.
- [10] 吕超, 栗时平, 刘桂英, 等. 牵引电网基波正负序电流提取方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2016 (7) : 89-94.
- [11] 吕晓琴, 张秀峰, 章春军. 无锁相环单相电路谐波及无功电流综合检测新方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010 (6) : 45-48.
- [12] 陆秀令, 张松华, 曹才开, 等. 单相电路谐波及无功电流新型检测方法 [J]. 高电压技术, 2007 (3) : 163-166.
- [13] 段胜朋, 李群湛, 杜雪松, 等. 同相供电系统的改进型电流检测方法 [J]. 电网技术, 2010 (9) : 65-69.
- [14] 丁菊霞, 张华俊, 张秀峰. 一种改进的无锁相环三相电路谐波电流检测方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2009 (24) : 41-45.
- [15] 周林, 张风, 栗秋华, 等. 无锁相环 i_p-i_q 检测任意次谐波电流的新方法 [J]. 高电压技术, 2007, 33 (7) : 129-133.
- [16] 丁菊霞, 张华俊, 张秀峰. 基于平均值理论的无锁相环单相电路谐波电流检测方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010 (1) : 26-30.
- [17] 邓建峰. 高速铁路牵引变电所220 kV干式电流互感器介质损耗值在线监测研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (12) : 125-129.
- [18] 李春兰, 夏兰兰, 王成斌, 等. 基于椭圆域分割的触电电流混沌检测方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (15) : 69-76.
- [19] 王洪诚, 王蕾, 沈霞, 等. 基于改进增益型自适应LMS算法的谐波检测方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (5) : 42-46.
- [20] 张秀峰, 连级三. 基于斯科特变压器的新型同相AT牵引供电系统 [J]. 机车电传动, 2006 (4) : 14-18.
- (收稿日期: 2017-11-13) **EA**