

面向微电网集群的多端口能量路由器及其分布式控制策略

郁家麟¹, 肖龙海¹, 胡舟¹, 赵玉勇¹, 聂建波², 谢晔源³, 段军³

(1. 国网浙江海宁市供电有限公司, 浙江 海宁 314400;

2. 国网浙江综合能源服务有限公司, 浙江 杭州 310014;

3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 能量路由器是实现微电网集群化的核心装备, 为了协调控制各端口的功率潮流, 传统的集中式控制多依赖于集中通信, 降低了系统的可靠性和灵活性。针对此问题提出了一种能量路由器的分布式控制策略, 无需中央控制器实现各端口功率的自主分配。能量路由器采用共直流母线结构, 各端口为独立的三相电压源型变流器(VSC), 通信信道仅存在于各端口与所连接微电网之间, 无需集中通信和相互通信。各微电网根据自身状态向能量路由器发出功率调控需求申请和紧急度, 各端口则以直流母线电压为公共信息, 自主确定所在端口的折扣率, 在保证直流母线电压稳定的前提下实现各端口的功率交换。最后通过Matlab/Simulink仿真验证了所提方案的有效性。

关键词: 微电网集群; 能量路由器; 分布式控制; 折扣率; 紧急度

中图分类号: TM464 文献标识码: A DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqed21243

Multi-terminal Energy Router and Its Distributed Control Strategy for Micro-grid Clusters

YU Jialin¹, XIAO Longhai¹, HU Zhou¹, ZHAO Yuyong¹, NIE Jianbo², XIE Yeyuan³, DUAN Jun³

(1. State Grid Zhejiang Haining Power Supply Company, Haining 314400, Zhejiang, China;

2. State Grid Zhejiang Integrated Energy Service Company, Hangzhou 310014, Zhejiang, China;

3. Nanjing Nanrui Jibao Electric Company, Nanjing 211102, Jiangsu, China)

Abstract: Energy router (ER) is the one of the core equipment to realize microgrid clustering. To coordinate the power flow among its ports, the traditional centralized control relies on centralized communication, which reduces the reliability and flexibility of the system. In order to solve this problem, a distributed control strategy of energy router was proposed, in which the power of each port is allocated independently without the central controller. The energy router adopts a common DC bus structure, each port is an independent three-phase voltage source converter (VSC), and the communication channel only exists between each port and the connected microgrid, without centralized communication and mutual communication. Each microgrid sends the power regulation demand application and urgency to the energy router according to its own state, and each port takes the DC bus voltage as the public information, independently determines the discount rate of the port, and realizes the power exchange of each port on the premise of ensuring the stability of the DC bus voltage. Finally, the effectiveness of the proposed scheme was verified by Matlab / Simulink simulation.

Key words: micro-grid clustering; energy router(ER); distributed control; discount rate; urgent need degree

随着新能源发电和微电网技术的迅速发展, 微电网(micro-grid, MG)的集群化问题已逐渐成为新的研究热点。微电网集群化是将邻近位置

的微电网、独立的分布式电源、储能及负荷等相互连接, 通过合理的协调控制策略实现多微电网之间的功率交互, 提高新能源发电的利用率。在

微电网集群中,各微电网可互为支撑,增大系统的等效容量,从而增强系统的抗风险能力,提高供电可靠性^[1-6]。

能量路由器(energy router, ER)是微电网集群化的核心设备,它是一个开放的多端口的电力电子化能量载体,为不同的发电或用电单位提供灵活的标准化接口^[6-8]。

目前,能量路由器主要有电力电子变压器结构和多端口电力电子系统结构等。文献[9]介绍了户用级微电网的常见结构,重点以多端口的共直流母线ER为对象,总结了端口变换器的不同控制方法及系统的通信调度策略。文献[10]在综合当前ER应用类型和现有技术基础上,设计了3层树形架构的分布式能源网络,并从配网、微电网和用户层论述了ER系统架构、能源接入、运行控制及通信调度的技术类型及实现方式。文献[11]对能量路由器的发展现状进行了详细的论述,重点针对基于电力电子变压器的主干网ER的电路拓扑、核心指标及关键技术等进行了总结,并从功率变换和信息技术的角度分析了电能路由器的技术要求。

一般而言,基于电力电子变压器的ER多用于主干网,而基于多端口变换系统的ER多用于配电网或家庭微电网。本文主要针对低压配电网,所设计的ER为共直流母线的多端口变换器结构。

从控制方式的角度,目前的能量路由器多采用集中式控制方法。文献[12]通过分析ER的能量模型和能量支路,从能量的角度进行ER控制。该策略通过能量调节器控制总的级联电压,利用电流调节器控制网侧电流。其余各子单元各司其职,实现功率平衡并改善瞬态性能。文献[13]构建了共直流母线的ER结构,并基于母线电压提出了分层协调控制策略实现功率调度,同时改善光伏控制策略切换引入的不稳定因素。文献[14]提出一种基于固态变压器的多LAN端口ER,并从混杂系统的切换系统理论角度进行分析,将链路层控制分为三层实现功率调度。文献[15]同样采用基于电力电子变压器的ER结构,并将控制体系分为三层:功能订制层、能量管理层和执行层。进一步分并网和离网模式分别进行控制设计,实现电能的有效管理。

一般而言,集中式控制多依赖于中央控制器通信或者邻近微电网通信,需要针对不同的微电

网集群设计特定的控制策略及信道。当新单元介入或切除时,中央控制器需要识别变动并重新对系统进行评估以调整控制策略,降低了系统的灵活性和可扩展性,不利于热拔插应用。此外,单点故障的发生容易导致系统性停机,可靠性较低。

本文采用多端口变换器ER结构构建微电网集群,同时纳入配电网(distribution network, DN)作为功率交换单元,并在此基础上提出一种无需中央控制器的分布式控制策略。各微电网仅与所连接的ER端口通信,上报功率需求申请和紧急度,ER端口则以直流母线电压为公共信息,自主设定折扣率,从而实现电能交易。该分布式控制策略提高了微电网集群的可靠性和灵活性,同时实现了并离网无缝切换,各微电网和大电网之间可相互支撑,在最大化利用新能源的同时,提高系统的抗风险能力。最后,通过仿真验证了本策略的有效性。

1 多端口能量路由器

本文所采用的能量路由器结构如图1所示,其含有多个端口用于连接各邻近的微电网以及配电网。ER的各端口均为单独的电压源型变流器(voltage source converter, VSC)^[9],所有的VSC采用共直流母线接法。连接微电网的各端口VSC定义为VSC_#1~VSC_#N,连接配电网的端口VSC定义为G_VSC。

本文中的各微电网均为自主子系统,可根据自身能量状态独立决定功率需求以及是否接入或切除。通信信道仅存在于各微电网MG_#1~MG_#N与ER的端口变换器VSC_#1~VSC_#N之间。通信的内容主要包含:1)微电网的功率需求 $P_{0,\#1} \sim P_{0,\#N}$;2)电能需求的紧急度 h 。功率需求是微电网根据内部发电曲线、储能状态及负载量等信息,通过一定的优化方法计算得出的净功率或净负荷需求。紧急度是微电网根据自身的吞吐潜力所确定的功率需求的紧要程度。这两个方面的信息由微电网传送给ER端口的VSC。

根据图1中功率需求 P_0 的方向,将 $P_0 > 0$ 定义为正,对应的微电网成为“正”型微电网;相应的将 $P_0 < 0$ 定义为负,对应的微电网成为“负”型微电网。对于紧急度 h ,其取值范围为 $0 \leq h \leq 1$,其中“1”表示紧急度高,需要ER进行优先调控;“0”表示可无需ER进行功率调节,优先级放低。

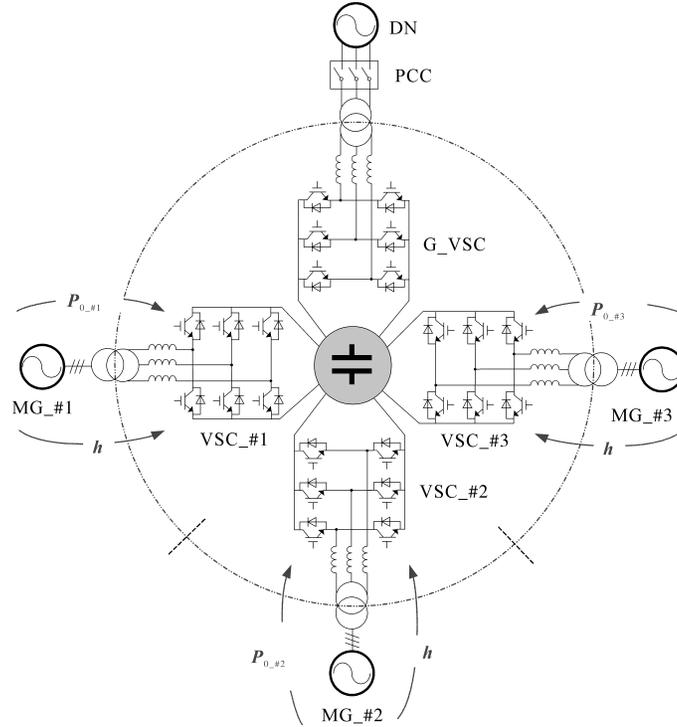


图1 多端口能量路由器结构

Fig.1 Structure of the multi-terminal energy router

2 能量路由器分布式控制

2.1 VSC_#N功率控制

ER的端口VSC_#N接收到微电网的功率需求 P_0 和紧急度 h 信息后,首先计算其真实功率需求:

$$P_i = h \times P_0 \quad (1)$$

进一步根据直流母线的状态计算得出折扣率 k ,将折扣后的值作为最终接受的功率,即

$$P = k \times P_i = k \times h \times P_0 \quad (2)$$

式中: k 为端口VSC_#N所施加的折扣率, $0 \leq k \leq 1$ 。

定义“正”型微电网折扣率为 k_p ，“负”型微电网折扣率 k_n 。折扣率 k 是关于直流母线电压 v_{DC} 的函数,具体的设计如图2所示。定义直流母线电压 v_{DC} 的额定值为 V_{rated} ,其正常工作的电压范围为 $[V_n, V_p]$,最大工作范围为 $[V_{low}, V_{up}]$ 。

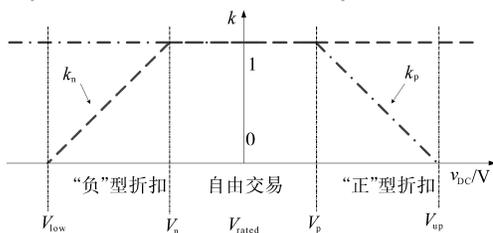


图2 不同类型微电网的折扣率曲线

Fig.2 Discount rate k for the micro-grids

当直流母线电压 v_{DC} 在 $[V_n, V_p]$ 区间波动时,

各微电网根据自身功率需求自由交易,无需打折;当直流母线电压 v_{DC} 上升到 $[V_p, V_{up}]$ 区间内,意味着有额外的功率注入到直流母线中,“负”型微电网功率需求不打折,而“正”型微电网功率需求进行线性折扣,直至 V_{up} 点降为0,此时将不再有功率注入母线;当直流母线电压 v_{DC} 下降到 $[V_{low}, V_n]$ 区间内,意味着有额外的功率从直流母线抽取,“正”型微电网功率需求不打折,而“负”型微电网功率需求进行线性折扣,直至 V_{low} 点降为0,此时将不再有功率从母线输出。

根据上述折扣过程,折扣率的计算公式如下:

对于“正”型微电网:

$$k_p = \begin{cases} 1 & v_{DC} < V_p \\ -\frac{v_{DC}}{V_{up} - V_p} + \frac{V_{up}}{V_{up} - V_p} & V_p \leq v_{DC} < V_{up} \\ 0 & V_{up} \leq v_{DC} \end{cases} \quad (3)$$

对于“负”型微电网:

$$k_n = \begin{cases} 0 & v_{DC} < V_{low} \\ \frac{v_{DC}}{V_n - V_{low}} - \frac{V_{low}}{V_n - V_{low}} & V_{low} \leq v_{DC} < V_n \\ 1 & V_n \leq v_{DC} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 G_VSC并/离网切换及功率控制

并网端口G_VSC将微电网集群与配电网相连通,在进行功率平衡的同时保证并/离网模式平

滑切换。G_VSC并网前首先检测电网侧电压,如果满足要求则直接闭合PCC开关,然后启动控制算法。并网后的VSC工作在二极管整流状态,只要保证并网前直流母线电压 v_{D0} 高于自然整流电压,便不会出现电流冲击,实现并网过程的平滑过渡。

并网后,G_VSC的控制策略如图3所示,其基本架构为 $d-q-0$ 坐标系下的双闭环整流器控制^[3]。本文此基础上对电压环进行了改进,提出了基于限幅的G_VSC控制方法,使其根据母线电压自动调整并网功率,满足微电网集群在并网条件下的相互支撑要求,提高系统的弹性和抗干扰能力。

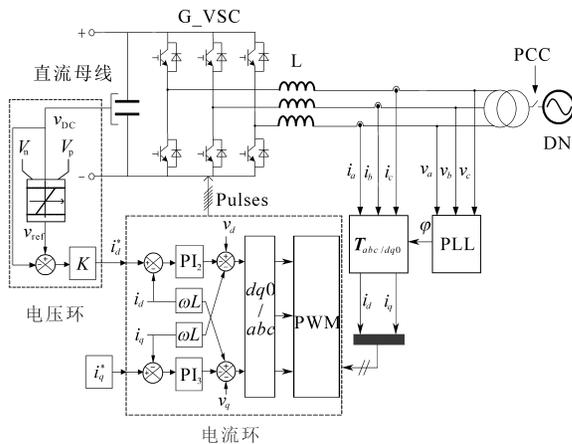


图3 G_VSC的控制策略

Fig.3 Control scheme of the G_VSC

首先通过文献[16-17]中的算法捕获电网电压的相位 φ ;然后对电感电流 $[i_a, i_b, i_c]$ 进行坐标变换得到 $[i_d, i_q]$,坐标变换矩阵为

$$T_{abcdq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\varphi & \cos(\varphi - 2\pi/3) & \cos(\varphi + 2\pi/3) \\ -\sin\varphi & -\sin(\varphi - 2\pi/3) & -\sin(\varphi + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

进一步可在 $d-q-0$ 坐标系下设计 d 通道与 q 通道的电流闭环控制。

对于改进后的电压外环,如图3所示,其反馈通道为直流母线电压 v_{DC} ,但其给定通道 v_{ref} 并非常数,而是同样来自 v_{DC} ,中间加入了限幅环节。限幅的上限为 V_p ,下限为 V_n ,于是可以得到 v_{ref} 的计算公式为

$$v_{ref} = \begin{cases} V_p & V_p \leq v_{DC} \\ v_{DC} & V_n < v_{DC} < V_p \\ V_n & v_{DC} \leq V_n \end{cases} \quad (6)$$

电压环不采用PI控制器,仅采用比例调节器K,不存在退饱和问题。

当直流母线电压 v_{DC} 在 $[V_n, V_p]$ 区间波动时,电压环的给定值 v_{ref} 与反馈值均为 v_{DC} ,二者差值为

零,比例控制器的输出(i_d^*)亦为零,G_VSC不进行功率调控,各微电网进行自由交易;当直流母线电压 v_{DC} 上升至 $[V_p, V_{up}]$ 区间时,由于限幅环节的作用,电压环的给定值 v_{ref} 变为 V_p ,由于比例控制器K的作用,母线电压 v_{DC} 被控制在 V_p 附近,此时由大电网负责吸收各微电网注入的额外功率,维持母线电压不变;当直流母线电压 v_{DC} 下降至 $[V_n, V_{low}]$ 区间时,由于限幅环节的作用,电压环的给定值 v_{ref} 变为 V_n ,由于比例控制器K的作用,母线电压 v_{DC} 被控制在 V_n 附近,此时由大电网注入功率,满足各微电网的用电需求,维持母线电压不变。

根据上述分析,在并网模式下,各微电网优先进行自由交易,保证电能本地消耗;当净功率或净负荷超出预定范围时,即母线电压超出 $[V_n, V_p]$ 区间时,由配电网负责平抑额外功率,为微电网集群提供强有力的支撑。

当配电网发生故障,G_VSC自主进行检测并断开PCC开关。此时G_VSC失去了供电电源,整流控制算法无法提供持续电能,进而退出工作。微电网集群再次进入离网状态,进行功率自平衡,离网过程平滑过渡,不存在冲击。

综上所述,本文所提出的分布式控制策略无需中央控制器进行统一调度,邻近微电网之间也不必相互通信。ER各端口变换器VSC_#N以及G_VSC仅根据本地信息进行控制,实现了微电网的集群化控制。

3 仿真实验

本文基于Matlab/Simulink搭建了图1所示的ER系统的仿真模型,该系统具有四个端口,其中VSC_#1~VSC_#3连接微电网,G_VSC连接配电网,每个端口加入了隔离变压器。此外,每个端口加入了一定的线路阻抗,模拟不同的连接线长度。

具体的参数设定为: $V_{low}=650$ V, $V_n=700$ V, $V_{rated}=750$ V, $V_p=800$ V, $V_{up}=850$ V。设计的直流母线电容为3 F。根据以上参数和式(3)、式(4)可计算得到不同类型微电网的折扣率 k_p 和 k_n 。

仿真总时长设计为20 s,其中微电网MG_#1为“正”型,功率需求为 $P_{0\#1}=50$ kW;微电网MG_#2为“负”型,功率需求为 $P_{0\#2}=-50$ kW;微电网MG_#3在0~10 s期间为“正”型,功率需求为 $P_{0\#3}=50$ kW,在10~20 s期间为“负”型,功率需求为 $P_{0\#3}=-70$ kW。三个微电网的功率紧急度均设为 $h=1$ 。初始母线电压设定为 $v_{DC}=V_n=700$ V,在0~

10 s期间ER的净功率为50 kW,直流母线电压将持续上升,在10~20 s期间ER的净功率为-70 kW,直流母线电压将下降。

3.1 并网模式

首先在并网模式下进行仿真验证,结果如图4所示,子图分别为直流母线电压 v_{DC} 以及各微电网的实际功率输出情况。图4a中,母线电压 v_{DC} 从0 s开始上升,到4.4 s达到800 V并维持不变;10 s时刻,母线电压开始下降,到13.3 s达到700 V并维持不变。可以看出,在并网模式下,母线电压被控制在 $[V_n, V_p]$ 区间,折扣机制并不会发挥作用,各微电网的实际输出功率与功率申请相等,意味着ER可满足各微电网的全部功率需求,净功率或净负荷由配电网补偿。

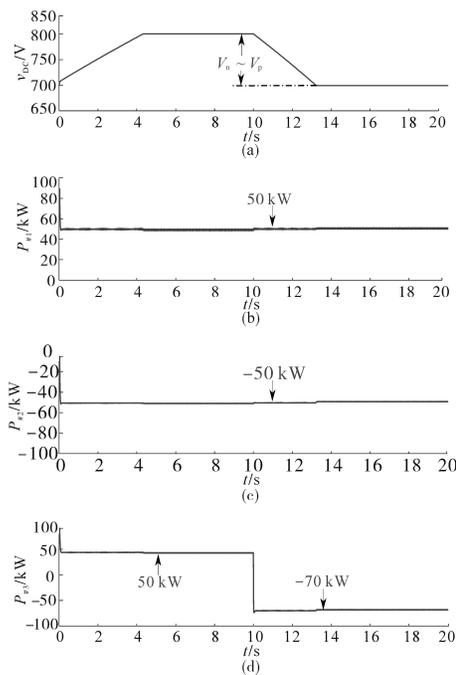


图4 并网模式运行结果

Fig.4 Performances of the MGs in the ER system under grid-connected mode

G_VSC的运行结果如图5所示。

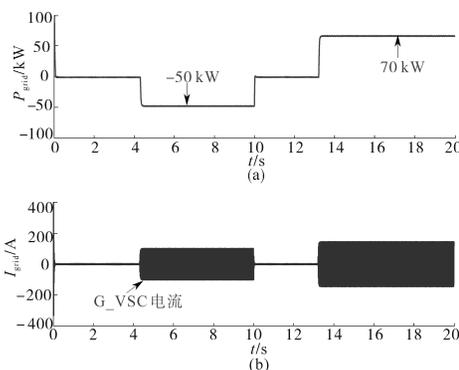


图5 G_VSC的运行结果

Fig.5 Performances of the G_VSC

如图5所示,当母线电压 v_{DC} 在4.4 s左右达到 V_p 时,G_VSC开始发挥作用,将系统的净功率 $P_{grid} = -50$ kW输出到配电网;当母线电压 v_{DC} 在13.3 s左右降至 V_n 时,G_VSC从配电网吸收 $P_{grid} = 70$ kW的功率,支撑系统内的微电网运行。从图5b中可以看到G_VSC电流变化的包络线,显示出了良好的跟踪效果。

3.2 离网模式

在离网模式下的仿真结果如图6所示。图6中,母线电压 v_{DC} 在4.3 s达到800 V并继续上升到825 V; v_{DC} 从10 s开始下降,在13.8 s左右降至700 V,并继续下降到675 V。根据所设计的电压区间,此变化过程共经历了“自由交易 I—折扣 I—自由交易 II—折扣 II”四个阶段。

1)自由交易 I:从0~4.3 s期间,母线电压上升但未超过 V_p ,各微电网按申请额与ER进行功率交换;

2)折扣 I:从4.3 s到10.8 s,母线电压上升至825 V又回落到 V_p ,期间“正”型微电网MG_#1和MG_#3的功率输出被线性降额;“负”型微电网MG_#2保持 $P_{\#2} = -50$ kW的输出;

3)自由交易 II:从10.8 s到13.8 s母线电压进一步下降但未超过 V_n ,各微电网按申请额与ER进行功率交换;

4)折扣 II:从13.8 s到20 s,母线电压下降 V_n 并进一步降至625 V。期间“正”型微电网MG_#1保持 $P_{\#1} = 50$ kW的输出,“负”型微电网MG_#2和MG_#3的功率输出被线性打折。

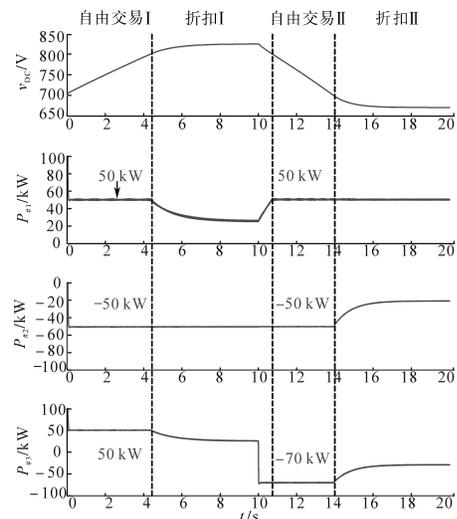


图6 离网模式运行结果

Fig.6 Performances of the MGs in the ER system under islanded mode

4 结论

重点利用多端口能量路由器解决微电网的集群化问题。为了使各微电网及配电网可通过交换功率提供相互支撑,同时保证系统的可靠性和“即插即用”的灵活性,提出了一种无需中央控制器的分布式控制策略。该策略中,能量路由器各端口分别与所连接微电网通信,根据母线电压自主决定功率传输量。仿真结果表明,该策略有效实现了系统高效集成,为微电网集群的发展提供了一定的理论支撑,具有实际的应用价值和理论价值。

参考文献

[1] 殷伟斌,熊连松,赵涛.并网逆变器发电系统稳定性分析方法综述[J].南方电网技术,2019,13(1):14-26.
 [2] 刘念,赵璟,王杰,等.基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J].电工技术学报,2018,33(8):31-35.
 [3] 熊连松,刘小康,卓放,等.光伏发电系统的小信号建模及其控制器参数的全局优化设计方法[J].电网技术,2014,38(5):1234-1241.
 [4] 周小平,陈燕东,周乐明,等.一种微电网架构及其自主协调控制策略[J].电工技术学报,2017,32(10):123-134.
 [5] 熊连松,卓放,刘小康,等.静止同步补偿器抑制电网功率振荡的机理研究[J].西安交通大学学报,2017,51(12):112-120.

[6] 段青,盛万兴,李振,等.电能路由器接入电力电子化配电网稳定性初步分析[J].电网技术,2019,43(1):227-235.
 [7] 肖迁,何晋伟,王浩,等.电网故障下的电能路由器直流电容电压平衡控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(2):20-25.
 [8] 王聪,徐晓贤,沙广林,等.基于能量路由器的交直流混合微电网潮流计算[J].电工电能新技术,2018,37(7):33-40.
 [9] 陈敏,李义强,田浩,等.户用型能量路由器的微电网应用技术[J].太阳能,2018,(1):58-61.
 [10] 郭慧,汪飞,张笠君,等.基于能量路由器的智能型分布式能源网络技术[J].中国电机工程学报,2016,36(12):3314-3324.
 [11] 宗升,何湘宁,吴建德,等.基于电力电子变换的电能路由器研究现状与发展[J].中国电机工程学报,2015,35(18):4559-4570.
 [12] 冯高辉,赵争鸣,袁立强.基于能量平衡的电能路由器综合控制技术[J].电工技术学报,2017,32(14):34-44.
 [13] 刘凯,陈才学,文军,等.基于能量分层协调控制的能量路由器[J].太阳能学报,2018,39(5):1388-1395.
 [14] 施灵卫,刘桂英.多LAN端口能量路由器切换控制策略研究[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):84-90.
 [15] 赖柏竹,吴靖,章玮明,等.基于电力电子变压器的能量路由器研究[J].浙江电力,2017,36(8):7-12.
 [16] 熊连松,卓放,刘小康,等.不对称电网同步相位的快速开环捕获方法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(22):5682-5691.
 [17] 熊连松,修连成,康志亮,等.不平衡工况下电网电压序分量快速提取方法[J].电力系统自动化,2019,43(11):144-152.

收稿日期:2019-12-10

修改稿日期:2019-12-22

(上接第39页)

verters[C]//2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012: 3-6.
 [4] Tang Z, Akin B. A new LMS algorithm based deadtime compensation method for PMSM FOC drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 6472-6484.
 [5] 闫朝阳,张喆,李建霞,等.单相高频链逆变器的解耦单极性移相调制及其死区优化[J].电工技术学报,2018,33(6):1337-1346.
 [6] 沈凤龙,满永奎,王建辉,等.变换器死区补偿方法[J].辽东学院学报(自然科学版),2016,23(3):192-198.
 [7] Herran M A, Fischer J R, Gonzalez S A, et al. Adaptive dead-time compensation for grid-connected PWM inverters of single-stage PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6):2816-2825.
 [8] 覃发梧.基于PI控制和重复控制的光伏单相并网逆变器的研究[D].南宁:广西大学,2018.
 [9] Ha J I. Current prediction in vector-controlled PWM inverters

using single DC-link current sensor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2):716-726.
 [10] Dong J, Fei W. Variable switching frequency PWM for three-phase converters based on current ripple prediction[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11):4951-4961.
 [11] 吴云亚,谢少军,阚加荣,等.逆变器侧电流反馈的LCL并网逆变器电网电压前馈控制策略[J].中国电机工程学报,2013,33(6):54-60.
 [12] Liao Y H. A novel reduced switching loss bidirectional AC/DC converter PWM strategy with feedforward control for grid-tied microgrid systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(3):1500-1513.
 [13] 高吉磊,张雅静,林飞,等.单相PWM整流器谐波电流抑制算法研究[J].中国电机工程学报,2010,30(21):32-39.

收稿日期:2019-10-31

修改稿日期:2020-02-03