

一种户用型多端口能量路由器功率协调控制策略

季韵秋, 李锐华, 胡 波

(同济大学 电子与信息工程学院 电气工程系, 上海 201804)

摘 要: 为了实现分布式电源接入及对电能进行有效管理, 将具备高度灵活的功率控制及信息交互功能的能量路由器应用于低压配电网, 使得源-网-荷-储能够一体化低碳运行, 从而提升负荷调节能力与新能源消纳水平, 保障电力系统稳定运行。因此, 设计了一种面向低压配电网应用的户用型能量路由器, 根据各端口应用对象特性, 对其拓扑结构及功率协调控制策略进行研究, 为电能生产和消费提供可靠的能源管理策略。最后, 通过仿真验证的方法, 建立 MATLAB/Simulink 仿真模型对其功率协调控制策略进行仿真验证。仿真结果表明: 所提出的多端口能量路由器功率协调控制策略能够实现多种运行模式下不同端口之间的功率互济和系统功率平衡控制, 在能源管理方面具有较高的灵活性、稳定性和可靠性。

关键词: 低压配电网; 能量路由器; 功率协调控制; 新能源消纳

中图分类号: TM52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)10-0031-08

doi: 10.12177/emca.2023.125

A Power Coordination Control Strategy for a Household Multi-Port Energy Router

Ji Yunqiu, Li Ruihua, HU Bo

(Department of Electrical Engineering, College of Electronic and Information Engineering,
Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: For the access of distributed power sources and the effective management of electric energy, energy routers with highly flexible power control and information interaction functions were applied to low-voltage distribution networks to achieve integrated operation of source-network-load-storage, thereby improving load regulation capabilities and new energy consumption levels, and ensuring the stable operation of the power system. Therefore, A household energy router for low-voltage distribution network application was designed, and its topology and power coordination control strategy were studied based on the characteristics of each port application object to provide a reliable energy management strategy for power production and consumption. Finally, a simulation model based on MATLAB/Simulink was established to verify its power coordination control strategy. The simulation results show that the proposed multi-port energy router power coordination control strategy can achieve power reciprocity and system power balance control between different ports under various operating modes, and has high flexibility, stability and reliability in energy management.

Key words: low-voltage distribution network; energy router; power coordinated control; renewable energy consumption

收稿日期: 2023-06-05; 收到修改稿日期: 2023-07-10

作者简介: 季韵秋(1999—), 女, 硕士在读, 研究方向为电力电子与电气传动。(通信作者)

李锐华(1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子与电气传动。

胡 波(1973—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力电子与电气传动。

0 引言

“双碳”背景下,越来越多的分布式能源接入电网,这对配电网智能化提出了更高的要求^[1]。由于太阳能、风能等可再生能源发电具有随机性、间歇性的特点,使得电力系统由以往的单侧随机系统转变为“双侧随机系统”,严重影响了电力系统的安全性^[2];另外,电动汽车等非线性负载导致电力用户从电网单向获取能量转为能量双向流动^[3]。这些变化使得传统的配电网控制策略已无法适应新能源接入配电网的应用环境^[4]。基于电力电子和信息技术的能量路由器(E-Router)能够为不同类型电能提供多种多样的电能接口^[5],且具有灵活的功率控制及信息交互功能。因此,通过多端口能量路由器整合分布式发电、储能、充电桩后能够有效接入低压配电网,实现源-网-荷-储一体化优化管理的协调运行,从而提升负荷调节能力与新能源消纳水平。

E-Router 最早被提出时以固态变压器为核心部件,面向中压配电网,实现交直流电网间的互联以及潮流的灵活控制。随着应用场景的不断丰富,面向低压配电网、交/直微电网应用的 E-Router 能量流的协调控制和优化调度研究将是未来重要发展方向之一^[6]。

在能源互联网应用中,从低压用户侧能源的供应端来看,E-Router 能够实现风能、太阳能等可再生能源接入的一体化运行,提高可再生能源的消纳水平。从电力用户端来看,在 E-Router 内部配置不同的电能转换接口,可以提高电能供应的灵活性^[7]。因此,E-Router 的多端口设计尤为必要。文献[8]中提出一种能接入中压柔性直流系统的通用四端口能量路由器,但缺乏对低压直流端口变流器的设计。文献[9]构建了一种基于五端口能量路由器的小型微网,通过优化光伏端口 DC/DC 变换器解决 E-Router 直流母线电压波动的问题,但其未对各端口拓扑结构及 E-Router 功率协调控制策略展开详细研究。文献[10]提出了一种户用型能量路由器,以 E-Router 内部直流母线电压大小为信号,对 E-Router 进行分区管理,实现离网模式下源荷储间的能量平衡,但没有对并网状态下 E-Router 与配电网间的能量互济情况进行详细研究。文献[11]研究了一种四端口能

量路由器,提出了一种双层控制策略,能够实现并网模式下能量路由器交流端口的功率控制,但并未对离网模式下的协调控制策略进行研究。文献[12]提出了一种五端口能量路由器,能够实现端口的潮流反转、柔性互联及储能对系统自稳定的控制,但系统运行模式多,控制十分复杂,在低压配电网中的应用仍然受到一定限制和阻碍。

为了有效管理大量分布式可再生能源及电动汽车等新型不确定性负载,面向低压配电网能源互联网应用,本文提出一种基于可再生能源接入的户用型多端口能量路由器,并对其功率协调控制策略进行研究,实现 E-Router 各端口之间以及 E-Router 与低压配电网之间的功率互济,实现用户侧低碳功能区源-网-荷-储一体化运行,从而提高新能源的消纳水平和配电网的供电可靠性及安全性。最后,通过构建 MATLAB/Simulink 系统仿真模型进行仿真分析和验证,为系统设计与实现奠定理论基础。

1 多端口能量路由器基本结构及运行模式

1.1 能量路由器基本结构

本文所提出的多端口能量路由器主要面向低压小容量电力用户,依据用户侧实际需求应用场景进行设计,注重考虑能源互联的扩展性与灵活性。多端口能量路由器作为电能互联管理与控制的核心设备,不同种类的电能通过与直流母线互联的电力变换器单元进行电能转换与传输。本文所提出的户用型低压配电网多端口能量路由器应用场景如图 1 所示。

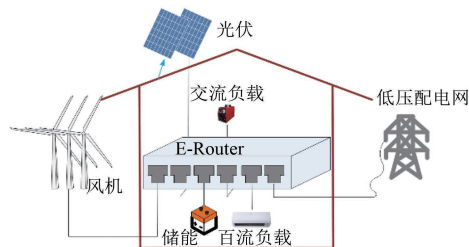


图 1 户用型多端口能量路由器应用场景示意图

户用型多端口能量路由器作为实现低碳功能区源-网-荷-储一体化运行的关键设备,能够为可再生能源(光伏、风能)发电、储能电池、低压配电

网以及常见的交直流负载提供不同的电能接口。本文所提出的多端口能量路由器端口基本结构如图 2 所示。

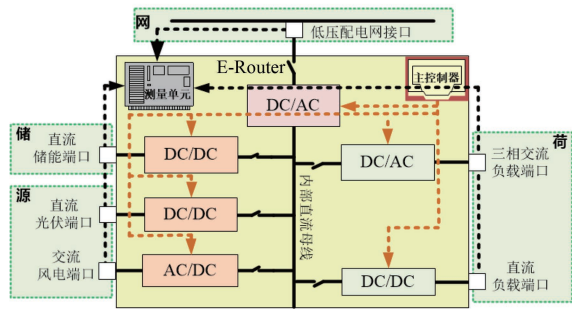


图 2 户用型多端口能量路由器端口基本结构

1.2 能量路由器运行模式

为了尽可能提升用户侧低碳功能区新能源消纳水平,实现源-网-荷-储一体化运行,需要对 E-Router 运行模式进行分析。根据 E-Router 与低压配电网的连接状态,系统运行可划分为孤岛运行与并网运行两种模式。

在低压配电网中,通常 E-Router 运行在并网模式下。此时,主要通过网侧变流器实现 E-Router 与配电网之间的功率交互,并由配电网维持整个系统的功率平衡。当低压配电网故障时,E-Router 能够以孤岛模式运行,孤岛模式运行期间主要通过储能单元维持整个系统的功率平衡。一旦配电网恢复,多端口能量路由器可以重新进入并网运行模式。

2 多端口能量路由器功率协调控制策略设计

为了实现用户侧低碳功能区源-网-荷-储一体化运行,本文提出了一种基于主从控制的户用型能量路由器功率协调控制策略,并给出了能量路由器不同端口变流器的设计方案。

2.1 能量路由器功率协调控制策略

能量路由器控制单元由主控制器和各端口变流器控制器组成。在不同的运行模式中:主端口变流器采用定电压控制维持 E-Router 直流母线稳定、协调系统功率流动;其他端口变流器根据控制指令,工作在相应模式下。

为了提高新能源消纳水平,本文以新能源消纳主信号,对 E-Router 工作模式进行如表 1 所示

的划分。

表 1 E-Router 工作模式划分

运行模式	工作模式	新能源消纳
并网	能量路由器 释放功率	$P_{PV} + P_{WT} > P_L$
	能量路由器 吸收功率	$P_{PV} + P_{WT} < P_L$
离网	储能单元 释放功率	$P_{PV} + P_{WT} < P_L$

根据表 1 中的模式,对各功能单元变换器进行功率协调控制,最终实现 E-Router 系统的源-网-荷-储功率平衡。即满足式(1):

$$P_{WT} + P_{PV} + P_{grid} + P_{bat} + P_{load} = 0 \tag{1}$$

式中: P_{grid} 为电网与 E-Router 的功率交互, P_{grid} 为正表示 E-Router 从配电网吸收功率; P_{WT} 、 P_{PV} 分别为风电端口、光伏端口输入到 E-Router 的功率; P_{bat} 为储能单元释放功率。

2.2 能量路由器端口变流器功率控制策略

2.2.1 网侧端口变流器

在 E-Router 并网运行模式下,网侧端口变流器主要用于实现 E-Router 与配电网之间的功率交互。本文选择电压源型变流器(VSC)作为 E-Router 网侧端口变流器,其为双向 DC/AC 变换器,具备能量双向流动的功能。

为了维持并网运行模式下 E-Router 内部系统的功率平衡和直流母线电压稳定,网侧 VSC 采用定直流电压控制,控制框图如图 3 所示。图 3 中, $u_{s(abc)}$ 、 $u_{c(abc)}$ 和 $i_{(abc)}$ 分别表示交流系统三相电压、VSC 交流端三相电压和电流瞬时值; $u_{s(dq)}$ 和 $i_{(dq)}$ 分别表示交流系统三相电压和交流侧三相电流在 dq 坐标轴上的等效分量; U_{dc} 、 i_{dc} 分别表示直流侧电压和电流; U_{dref} 表示直流侧电压给定值;假设三相主电路参数完全相同, L_s 为等效电感; θ 为电压空间矢量极角,由交流侧电压锁相环获取; ω 为系统额定电压频率。

基于瞬时功率理论,且在电网电压定向的同步旋转坐标系中,交流系统输出的瞬时有功功率 P_s 、无功功率 Q_s 可表示为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_d \\ Q_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_q \end{cases} \tag{2}$$

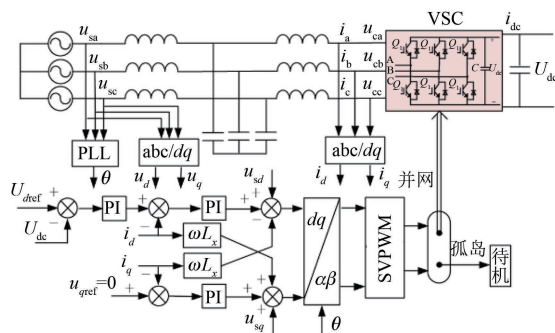


图3 网侧端口变流器控制框图

在三相 VSC 中,直流侧输入有功功率瞬时值为 $p=i_{\text{dc}}U_{\text{dc}}$,不考虑变换器及线路损耗,则根据功率平衡原理,VSC 输出到直流侧的有功功率等于配电网输入到 VSC 的有功功率,则有:

$$i_{\text{dc}} U_{\text{dc}} = p = 3/2 u_{\text{sd}} i_d \quad (3)$$

$$U_{dc} = 3u_{sd}i_d/2i_{dc} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可以看出,由于配电网三相交流电压保持不变,因此需要在功率波动时通过控制有功电流 i_d 来稳定直流母线电压 U_{dc} 。如图3所示,本文采用了电压外环和电流内环的双闭环控制结构。外环将直流电压给定值与反馈值的偏差经过PI调节后输出作为有功电流的参考值 i_{dref} ,将 q 轴电流给定值设置为0以实现单位功率因数。内环控制为实现VSC交流侧输出电流快速跟随电流参考值,本文中采用直接电流控制法,基于 dq 旋转坐标系对有功电流与无功电流进行解耦,电流控制器的输出量作为VSC输出电压的期望值,通过脉宽调制后可获得各桥臂的触发脉冲。

2.2.2 风力发电端口变流器

由于 VSC 具有独立控制有功功率和无功功率的特性^[13], 风力发电单元选用 VSC 作为风力发电端口变流器, 将风力发电机所发电能接入到 E-Router 内部的直流母线。此时 VSC 工作在整流模式下。

为了保证风力发电接入端口能够有效吸收风力发电交流系统发出的电能,风电端口变流器采用 PQ 控制策略。其控制框图如图 4 所示。图 4 中, P_{ref} 为风电交流系统发出的有功功率; P 为风力发电端口变流器输出的有功功率; Q_{ref} 为风电交流系统发出的无功功率。

由式(1)可知,由于三相交流系统电压保持

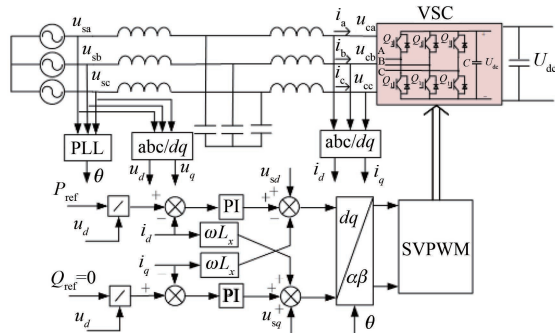


图 4 风电端口变流器控制框图

不变,即 u_{sd} 保持不变,有功电流参考值 i_{dref} 可由有功功率参考值 P_{ref} 计算得到, q 轴电流给定值设置为 0 以实现单位功率因数。通过实现对 VSC 输出有功功率和无功功率的独立控制,使得风力发电端口变流器输出功率能有效跟踪风力发电机发出的电能,为 E-Router 提供新能源发电电能。

2.2.3 交流负载端口变流器

能量路由器交流负载端口能够为用户提供电压幅值和频率稳定的交流电,保障用户交流负荷的用电需求。因此交流负载端口仍选用 VSC 拓扑结构,并采用恒压/恒频控制策略。此时 VSC 工作在逆变模式下,控制框图如图 5 所示。

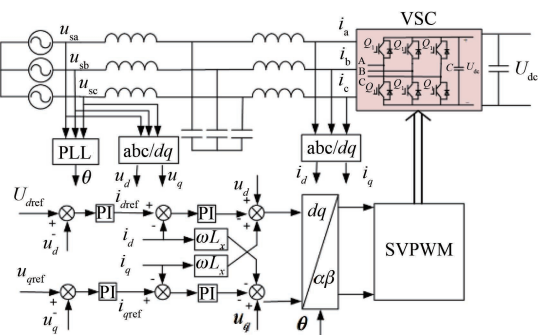


图 5 交流负载端口变流器控制框图

图 5 中, u_{dref} 、 u_{qref} 表示电压参考值。恒压/恒频控制是在下垂控制的基础之上实现的, 其参考电压在线路设计时直接给定。考虑到交流电网频率稳定, 控制系统参考频率及角频率由给定频率为 50 Hz 的虚拟锁相环提供。恒压/恒频控制采取如图 5 所示外环电压、内环电流的双闭环控制方式, 以保证负载负荷的电压幅值和频率大小近似保持不变。

2.2.4 光伏发电端口变流器

光伏发电端口变流器主要用于将光伏发出的

电能接入到 E-Router 直流母线,供能量路由器进行电能分配。由于光伏发电受光照的影响较大,其输出功率具有随机性和波动性,并且输出电压波动范围大。因此,为了实现光伏发电宽电压范围接入,提高 E-Router 的适用性,本文采用一种通用型双向 DC/DC 变流器^[14],以满足 E-Router 不同直流端口的接入需求,其拓扑结构如图 6 所示。用作光伏接入端口变流器时,该双向 DC/DC 变换器工作在 Boost 模式下,实现功率的单向流动。

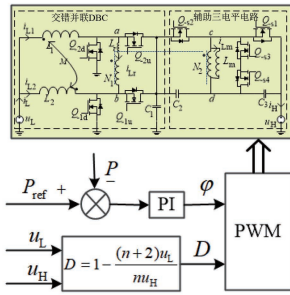


图 6 光伏发电端口 DC/DC 变换器控制框图

由图 6 可知,该 DC/DC 变换器由内置变压器、一对交错半桥双向电路和一个辅助三电平电路组成。其中: u_H 、 u_L 和 i_H 、 i_L 分别为变换器高/低压侧电压和电流; L_1 、 L_2 分别为低压侧耦合滤波电感;内置变压器变比 $n = N_1/N_2$; L_r 等效为变压器原边漏感和外加电感; L_m 为变压器副边侧的等效励磁电感; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为箝位电容; P_{ref} 为光伏发电装置产生的电能; P 为变换器实际输出功率。

变流器的电压增益为^[14]

$$G = \frac{u_H}{u_L} = \frac{n+2}{n(1-D)} \quad (5)$$

传输功率表达式如式(6)所示:

$$P = \begin{cases} P_{base} [2\varphi^2 + 2\pi\varphi + 4\pi^2(D^2 - D) + \pi^2] & \varphi \in [-0.5\pi, 2\pi(0.5 - D)] \\ P_{base} [\varphi^2 + 4\pi(1 - D)\varphi] & \varphi \in (2\pi(0.5 - D), 0] \\ P_{base} [-\varphi^2 + 4\pi(1 - D)\varphi] & \varphi \in (0, 2\pi(D - 0.5)] \\ P_{base} [-2\varphi^2 + 2\pi\varphi - 4\pi^2(D^2 - D) - \pi^2] & \varphi \in (2\pi(D - 0.5), 0.5\pi] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{base} = \frac{n^2 u_H^2 T_s}{8(n+2)\pi^2 L_r}$; D 为开关管 Q_{-1d} 、 Q_{-2d} 的占空比;移相角 φ 为内置变压器初级侧和次级侧电压之间的角度差; T_s 为开关周期。

为了保证光伏端口变流器输出的有功功率 P 能有效跟踪光伏装置发出的电能,其控制策略如图 6 所示。控制环节为电压调节环和功率环,根据式(5)可以计算得到占空比,功率环将功率给定值与反馈值的偏差经过 PI 调节后得到 φ ,通过控制 φ 实现对功率流向的控制,实现光伏发电装置产生的电能的有效接入。

2.2.5 储能端口变流器

储能端口 DC/DC 变换器的主要作用是在 E-Router 孤岛运行时支撑和维持 E-Router 的直流母线电压并为负载提供电能,从而保证 E-Router 正常运行。储能端口变流器选用图 6 所示的通用型双向 DC/DC 变换器拓扑结构,其高压侧连接 E-Router 内部直流母线,低压侧连接储能电池。本文仅考虑在孤岛模式下,储能单元作为源参与 E-Router 功率分配,考虑到功率平衡,仅讨论储能工作于放电模式下的情况。

孤岛运行状态下,储能端口变换器采用定高压侧直流电压控制策略。针对储能侧变流器设计的控制策略如图 7 所示。图 7 中, u_L 、 u_H 分别为储能装置输出电压和 E-Router 内部直流母线电压; u_{Href} 为母线电压参考值; i_L 为储能装置电流。其控制环节由电压外环和电流内环组成,通过控制 φ 实现高压侧电压的稳定控制。

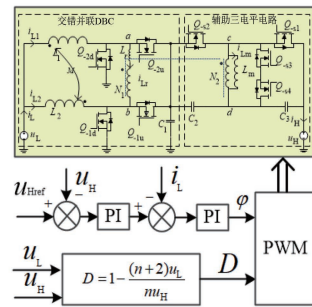


图 7 储能端口 DC/DC 侧变换器控制策略框图

3 仿真分析及验证

为了验证本文所提出的 E-Router 功率协调控制策略的可行性及有效性,在 MATLAB/Simulink

中搭建了由 1 路联网单元、风力发电单元、光伏单元、储能单元和交流负载单元组成的多端口能量路由器仿真模型,仿真系统参数如表 2 所示。

表 2 多端口能量路由器仿真参数

变换器	参数名称	参数值
DC/DC (储能端口 光伏端口)	电感 $L_1、L_2/\mu\text{H}$	600 (耦合系数 0.5)
	开关频率 f/kHz	50
	高压侧电容 $C_1、C_2、C_3/\mu\text{F}$	180、180、200
	内置变压器变比 n	9:10
	低压侧电容 $C_4/\mu\text{F}$	10
VSC (低压配电网端口 风电端口 交流负载端口)	滤波电感 $m\text{H}$	2
	开关频率 f/kHz	10
	母线侧电容 μF	1000
	滤波电容 μH	6

3.1 能量路由器并网运行仿真验证

3.1.1 能量路由器功率释放模式仿真分析

应用场景:当系统光伏和风电出力无法完全被负荷消纳,即: $P_{PV}+P_{WT}>P_L$ 时,E-Router 需要向配电网释放电能。其能量路由器各端口功率及直流母线电压波形如图 8 所示,仿真结果见表 3。

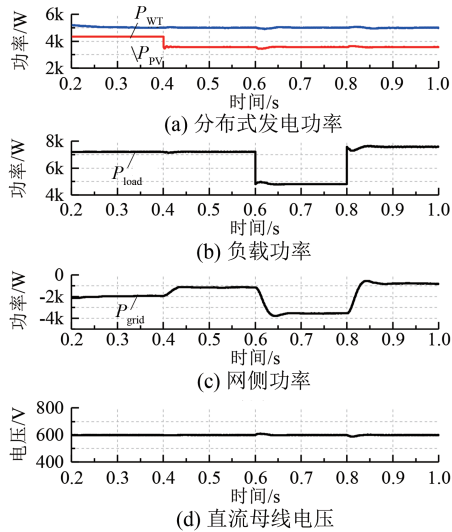


图 8 能量路由器各端口功率及直流母线电压波形

由图 8 和表 3 可以看出,分布式单元出力发生变化,负载突增/减时,网侧变换器能够维持 E-Router 的母线电压实现快速稳定。

3.1.2 能量路由器功率吸收模式仿真分析

应用场景:当系统光伏和风电出力无法满足

负荷需求,即: $P_{PV}+P_{WT}<P_L$ 时,E-Router 需要从配电网吸收电能供负荷正常运行。其能量路由器各端口功率及直流母线电压波形如图 9 所示,仿真结果见表 4。

表 3 仿真结果

	0.4 s	0.6 s	0.8 s
P_{WT}	5	5	5
P_{PV}	4.3→3.5	3.5	3.5
P_{load}	7.2	7.2→4.8	4.8→7.8
P_{grid}	-2.1→-1.3	-1.3→-3.7	-3.7→-0.7

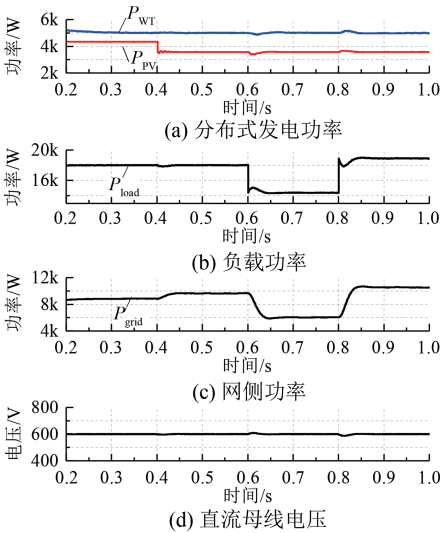


图 9 能量路由器各端口功率及直流母线电压波形

表 4 仿真结果

	0.4 s	0.6 s	0.8 s
P_{WT}	5	5	5
P_{PV}	4.3→3.5	3.5	3.5
P_{load}	18	18→14.4	14.4→18.9
P_{grid}	8.7→9.5	9.5→5.9	5.9→10.4

由图 9 和表 4 可以看出,在分布式单元出力发生变化、负载突增/减时,E-Router 的母线电压也能够快速稳定在 600 V。

3.1.3 能量路由器功率潮流反转仿真验证

应用场景:当 E-Router 发生潮流反转时,E-Router 需要根据本地负荷大小,从配电网吸收/释电能维持系统稳定运行。其能量路由器各端口功率及直流母线电压波形如图 10 所示,仿真结果见表 5。

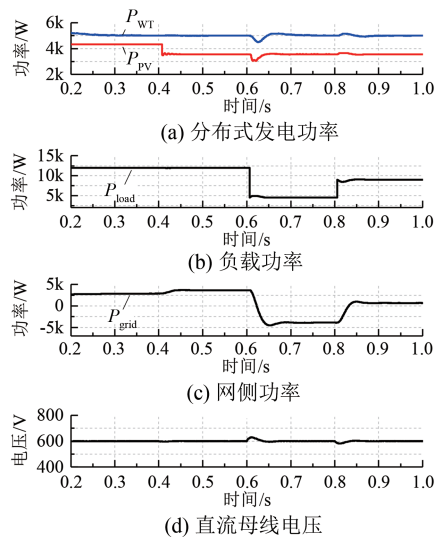


图 10 能量路由器各端口功率及直流母线电压波形

表 5 仿真结果				kW
	0.4 s	0.6 s	0.8 s	
P_{WT}	5	5	5	
P_{PV}	4.3→3.5	3.5	3.5	
P_{load}	12	12→4.5	4.5→9	
P_{grid}	2.7→3.5	3.5→-4	-4→0.5	

由图 10 和表 5 可以看出,在分布式单元出力发生变化、负载突增/减时,E-Router 的母线电压能够快速稳定。

3.2 能量路由器孤岛模式仿真验证

应用场景:当低压配电网故障时或在偏远地区,E-Router 将以孤岛模式运行,孤岛模式运行期间主要通过储能单元支撑系统母线电压和维持整个系统的功率平衡。此时若系统光伏和风电出力无法满足负荷需求,E-Router 通过从储能电池吸收功率弥补负荷用电需求。其能量路由器各端口功率及直流母线电压波形如图 11 所示,仿真结果见表 6。

表 6 仿真结果				kW
	0.4 s	0.6 s	0.8 s	
P_{WT}	5	5	5	
P_{PV}	4.3→3.5	3.5	3.5	
P_{load}	18	18→14.4	14.4→18.9	
P_{bat}	8.7→9.5	9.5→5.9	5.9→10.4	

由图 11 和表 6 可以看出,在分布式单元出力

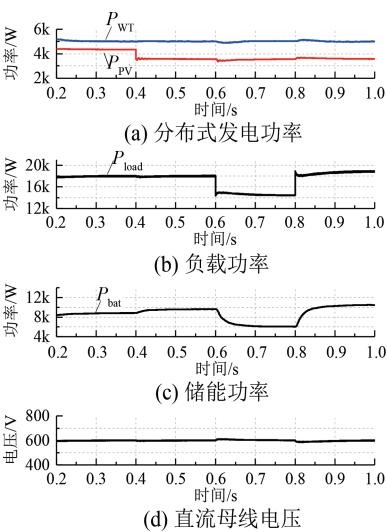


图 11 能量路由器各端口功率及直流母线电压波形

发生变化,负载突增/减时,E-Router 的母线电压能够快速稳定在 600 V,验证了 E-Router 在离网模式下能实现系统内功率平衡。

4 结 语

本文提出了一种面向低压配电网的户用型多端口能量路由器应用方案,设计了能量路由器各端口变流器的功率控制策略,并进行了仿真分析。仿真结果表明:本文所提出的户用型多端口能量路由器及其功率协调控制策略实现了用户侧低碳功能区源-网-荷-储一体化运行,有效提升了低压配电网中的负荷调节能力与新能源消纳水平,为新能源利用提供了一种有效的解决方案。

【参考文献】

[1] ALAM M S, AL-ISMAIL F S, ABIDO M A. Power management and state of charge restoration of direct current microgrid with improved voltage-shifting controller [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 44 (Part: A): 103253-103267.

[2] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.

[3] 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.

[4] 朱晓荣,马英乔,赵澄颖. 基于模型预测控制算法的多风储直流微电网分布式电压二次控制策略

- [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 184-191.
- [5] 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): 3314-3325.
- [6] WANG R, JIANG S, MA D, et al. The energy management of multiport energy router in smart home [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2022, 68(4): 344-353.
- [7] LIU B, WU W H, ZHOU C X, et al. An AC-DC hybrid multi-port energy router with coordinated control and energy management strategies[J]. IEEE Access, 2019, 7: 109069-109082.
- [8] 葛健, 杨晨, 杨景刚, 等. 基于通用电能路由器的微电网架构及其控制方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 123-130.
- [9] 张程翔, 陆莹, 贺军, 等. 基于多端口能量路由器的微网系统及其调试[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13): 5149-5155.
- [10] 王建元, 张泽强, 宋月航. 户用型能量路由器控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(6): 174-179.
- [11] 袁兴宇, 苏适, 李耀华, 等. 一种四端口能量路由器的协同控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 82-89.
- [12] 李振, 盛万兴, 段青, 等. 基于储能稳压的交直流混合电能路由器协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 121-134.
- [13] 荣梦飞, 吴红斌, 吴通华, 等. 提高直驱风电经柔直并网系统稳定性的改进 V/F 控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1698-1706.
- [14] YAN Z, ZENG J, LIN W, et al. A novel interleaved nonisolated bidirectional dc-dc converter with high voltage-gain and full-range zvs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 7191-7203.

(上接第 23 页)

- [9] 王金浩, 宋述勇, 李瑞, 等. 双向全桥 DC/DC 变换器电流应力和回流功率优化[J]. 电力电子技术, 2022, 56(6): 120-122+133.
- [10] 孙志峰, 肖岚, 王勤. 输出并联型双有源全桥变换器控制技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1811-1831.
- [11] 蔡逢煌, 石安邦, 江加辉, 等. 结合电流应力优化与虚拟电压补偿的双有源桥 DC-DC 变换器三重移相优化控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2559-2571.
- [12] HUANG J, WANG Y, LI Z Q, et al. Unified triple-phase-shift control to minimize current stress and achieve full soft-switching of isolated bidirectional DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4169-4179.
- [13] 童安平, 杭丽君, 李国杰. 三重移相控制下 DAB 变换器全局优化控制策略及分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6037-6049.
- [14] 苏都. 基于三重移相控制的双有源桥变换器性能优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

(上接第 30 页)

- [14] 张晓光, 孙力, 赵克. 基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 111-116.
- [15] 姚建河, 蔡亮, 陈铁成, 等. 基于龙伯格扰动观测器的 PMSM 模型预测控制[J]. 微电机, 2021, 54(9): 90-95.