

分布式配电网多端口能量路由器协同控制方法

许叶林¹, 芦新强², 赵昂¹, 马利¹

(1. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 国网伊犁伊河供电有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 提出了分布式配电网多端口能量路由器协同控制方法, 实现了在功率均衡与母线电压平稳的前提下无缝切换多端口能量路由器各工作模式, 保障配电网运行的安全稳定。该方法选取包含并网接口、蓄电池接口、负载接口以及光伏接口的四端口能量路由器拓扑结构作为协同控制对象, 结合分布式与集中式控制设计分层协同控制方法, 实现对蓄电池充、放电的均流稳压控制, 以及工作模式切换时的直流母线电压平稳与功率均衡控制, 达到无缝切换各工作模式、实现各工作模式协同运行的目的。结果表明, 在该方法的控制下, 多端口能量路由器中储能蓄电池可实现恒流充电中两相电路充电电流的均衡, 保持恒压充、放电过程中蓄电池电流、电压、恒压放电过程中母线电压的稳定, 能量路由器可实现多工作模式切换过程中功率的均衡及直流母线电压的稳定, 为分布式配电网平稳安全运行提供保障。

关键词: 分布式配电网; 多端口; 能量路由器; 协同控制; 蓄电池充放电; 无缝切换

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24039

Cooperative Control Method of Multi-port Energy Router in Distributed Distribution Network

XU Yelin¹, LU Xinqiang², ZHAO Ang¹, MA Li¹

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Economic and Technical Research Institute, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 2. State Grid Yili Yihe Power Supply Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: A cooperative control method for multi-port energy routers in distributed distribution networks was proposed. Under the premise of power balance and bus voltage stability, seamless switching of various working modes of multi-port energy routers was realized to ensure the security and stability of distribution network operation. In this method, the four-port energy router topology including grid connection interface, battery interface, load interface and photovoltaic interface was selected as the cooperative control object, distributed and centralized control was used to design a hierarchical cooperative control method to realize the current sharing and voltage stabilization control of battery charging and discharging, and the DC bus voltage stability and power balance control during the switching of working modes, so as to seamlessly switch various working modes, realize the purpose of cooperative operation of various working modes. The results show that under the control of this method, the energy storage battery in the multi-port energy router can achieve the balance of the charging current of the two-phase circuit in the constant current charging process, and maintain the stability of the battery current and voltage in the constant voltage charging and discharging process, and maintain the stability of the bus voltage in the constant voltage discharging process. In the process of switching multiple working modes, the energy router can realize the balance of power and the stability of DC bus voltage, thus providing guarantee for the stable and safe operation of the distributed distribution network.

Key words: distributed distribution network; multi-port; energy router; cooperative control; battery charge and discharge; seamless switching

位于电力系统尾端的分布式配电网与电力用户直接相连, 其特点包括运行方式多、设备种类多及规模较大等。在当前社会经济的持续发

展以及电力需求类别的不断增长过程中, 以往电力网络的局限性、环保以及能源危机等问题逐步显现, 在此状况下, 分布式发电技术因所具备的

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGXJ0000TKJS1800306)

作者简介: 许叶林(1990—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为配电网规划、增量配电, Email: xyyll90@163.com

发电方式多变、低污染、高利用率与储量等特点,逐渐受到人们的关注。该技术由分布式发电单元构成,所运用能源为生物质能、太阳能及风能等可再生能源^[1-2]。但该技术同样存在部分缺陷,如不可控功率、随机与间歇性的时间尺度、分散的地理位置等,因此需通过向分布式配电网内融入储能装置提供备用与支持的方式,将适度缓冲提供给波动的能量,实现对分布式配电网接纳分布式能源发电系统能力的提升,以此降低分布式发电技术对分布式配电网的冲击力,并最大限度地提升其能源使用率^[3]。另外,由于融入了储能装置与分布式能源,能够有效提升分布式配电网的能源供应种类,并将其以往单向的能量流动调整成双向的能量流动^[4]。

多端口能量路由器的核心为电能,对热、冷、燃气及电等诸多能源实施汇聚与管理,有效融合信息系统和能源系统,属于一种对能源互联网提供有力支撑的核心装置^[5]。其最为关键的特点之一即其储能单元与负载单元等具备多种工作模式,并不是始终保持工作运行状态,故其运行时需考虑到不同工作模式的切换。因多端口能量路由器具备有限的容量,若强制切换工作模式易导致母线电压出现突变,无法实现安全平稳运行的目的^[6]。故而需采取一种恰当的控制方法,达到安全平稳切换其各种工作模式、实时响应分布式配电网调度的目的。分布式控制能够将通信需求降低,但存在统筹功率分配差的缺陷;集中式控制具有协调控制性能强、功率统筹分配效果好等优点,而其缺点为对通信宽带的需求较高^[7-8]。

基于以上分析,本文研究一种分布式配电网多端口能量路由器协同控制方法,通过将分布式控制与集中式控制有效结合,在低通信需求的前提下,实现了对功率统筹分配的协同控制效果,达到在母线电压平稳与能量均衡的基础上无缝切换各种工作模式的目的,保障分布式配电网的安全平稳供电运行。

1 多端口能量路由器协同控制

1.1 分布式配电网四端口能量路由器拓扑结构

选取光储一体的分布式配电网四端口能量路由器拓扑结构对其实施协同控制,其所提供的四个端口包括并网接口、储能蓄电池接口、负载接口及光伏接口,拓扑结构图如图1所示。

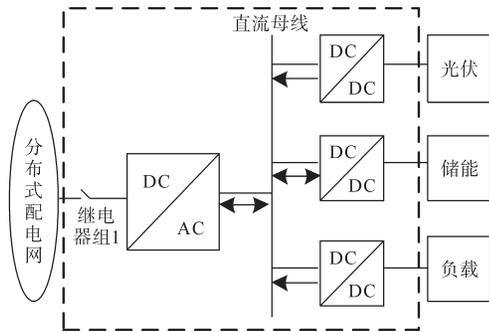


图1 分布式配电网多端口能量路由器拓扑结构图

Fig.1 Topology diagram of multi-port energy router in distributed distribution network

图1中,光伏接口属于能量路由器向光伏阵列所供应的接入端口,通过升压变换器将此端口与公共直流母线相连,能够达到恒压发电与最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制^[9];储能蓄电池接口是能量路由器提供给储能蓄电池的接入端口,通过交错并联双向DC/DC变换器将此端口与公共母线相连,它能够以实际需求为依据,控制储能蓄电池的充、放电,实现对电力系统功率平衡的有效控制;并网接口属于能量路由器提供给本地分布式配电网的接入端口,通过双向DC/AC变换器与继电器组将此端口与直流母线相连,不仅能够依据实际所需令能量路由器断开和分布式配电网的连接达到独立运行的目的,而且能够令能量路由器连接到分布式配电网,达到交换能量的目的^[10];负载接口是能量路由器提供给负载的接入端口,此端口通过DC/DC变换器实现与直流母线的连接,其职责是向端口内的负载供电。

1.2 协同控制方法

基于多类触发信号的分布式配电网多端口能量路由器工作模式多变,当其处于不同工作模式下时,其并联变换器具备差异性的工作模态,为了以平稳的直流母线电压与平衡的能量为前提无缝切换各类工作模式,需选取恰当的协同控制方法实现^[11]。在此以集中式和分布式相融合的分层控制方法,达到对电力系统中分布式配电网多端口能量路由器的协同控制。分层协同控制整体架构如图2所示。

图2中,分层协同控制的整体架构包括调度、微网控制及本地控制三层,各层的具体描述与职责为:1)调度层:当存在调度指令时,该层中的能量路由器集中式控制器将以其本身的工作状态为依据先行响应调度指令,其优先级最高,分布式配电网控制平台可实现对其管控领域内全部

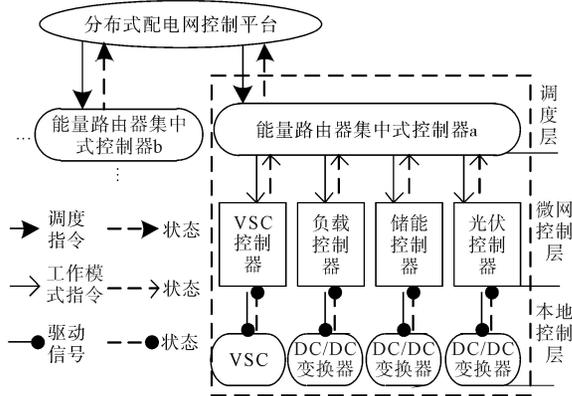


图2 分层协同控制整体架构图

Fig.2 Overall architecture diagram of hierarchical cooperative control

能量路由器的调度,达到能源互联的目的;2)微网控制层:该层的优先级适中,能量路由器集中式控制器在不存在调度指令的情况下,以每个变换器的实际工作模式为依据,选取恰当的工作模式,并将负载单元与储能单元的参考工作电流给出,同时在特定情况下将各个变换器本身的开关管闭锁信号给出;3)本地控制层:本地控制器对各个相应变换器的开关管动作实施操控,并将状态信息传送至微网控制层,同时对工作模式指令予以接收。电压源型变换器(voltage source converter, VSC)和光伏可较高程度地完成分布式控制,对于开关管的开启与关闭信号仅在切除或者投入时接收,而负载与储能控制器则另外需对参考工作电流信号予以接收^[12]。以负载的接入、光伏的出力、上级分布式配电网控制平台的调度指令与储能蓄电池超级电容荷电状态(state of charge, SOC)等为依据触发信号,该分布式配电网四端口能量路由器能够实施二、三、四端口能量路由,故其存在数种工作模式,应在所设计的分层协同控制方法下,实现对各种工作模式的无缝切换,保障分布式配电网的安全平稳运行。

1.2.1 分布式控制

分布式配电网多端口能量路由器中的VSC通过传统的 d, q 轴解耦电流与电压双闭环控制方式,达到配电网侧的单位功率因数运行的目的。为得到最高经济价值,分布式配电网多端口能量路由器中的光伏单元所运用到的控制方式为基于电压扰动的MPPT控制,也就是光伏在具备光照的情况下持续处于MPPT工作状态。分布式配电网多端口能量路由器中的储能单元主要包括双向升降压直流变换器与蓄电池,该单元有助于电力系统母线的平稳与能量的平衡,当光伏能量

较少时该单元能够实现能量的补充,而当光伏能量过高时,该单元能够实现能量的消解,其选用两段式充电与恒压放电方式^[13]。储能单元的充放电控制结构如图3所示。

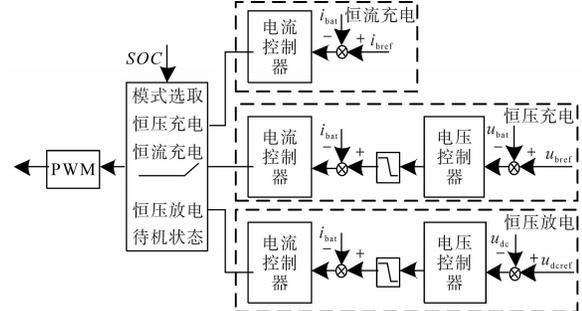


图3 储能单元充放电控制结构图

Fig.3 Charging and discharging control structure diagram of energy storage unit

储能单元的蓄电池具备恒流与恒压充电、待机以及恒压放电4种工作模式。储能单元在光伏能量充足时,为消解光伏单元过多的能量,开启充电模式,并以蓄电池的SOC为依据,前期选取恒流充电方式,当蓄电池的SOC升高至0.8时,变换至恒压充电方式;当蓄电池的SOC升高至0.9时,储能单元步入待机模式,其直流变换器也处于待机状态。各种工作模式下的控制方法如下:

1)恒流恒压两段式充电模式控制:当蓄电池处于恒流充电模式下时,选用电流单环控制接口变换器,此时现实充电电流 i_{bat} 作为被控变量;当处于恒压充电模式下时,选取将电压外环与电流内环相结合的双闭环控制接口变换器,同时将限幅环节融入电压外环输出中实现对电流的有效制约,避免充电中因过流导致的蓄电池损坏。

2)恒压放电模式控制:当蓄电池处于恒压放电模式下时,同样选用双闭环控制法控制接口变换器,也同样需要将限幅融入到外环输出中,避免过流现象出现在恒压放电过程中,但区别于恒压充电的是选取母线电压环作为外环。

3)均流控制:通常交错并联双向DC/DC变换器的两相参数均存在不同程度的差异,若仅通过以往的电流单环控制,无法实现其两相电流的平衡,因此,在此选用占空比较正器均流控制方法实现对其两相电流的均衡控制。占空比较正器控制结构如图4所示。

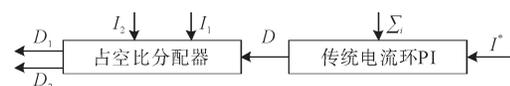


图4 占空比较正器控制结构图

Fig.4 Control structure diagram of duty cycle corrector

此控制方法的原理为运用占空比校正器二次分配占空比,达到电流均衡控制的目的,其数学表达式为

$$D_n = D + \Delta D_n = D + K_n D = D + \frac{|I'| - |I_n|}{|I'|} D \quad (1)$$

式中: I' 为平均电流值; I_n 为第 n 路($n=1$ 或 2)校正之后的电感电流; D_n 为第 n 路校正之后的占空比; D 为电流环输出占空比; $\Delta D_n, K_n$ 分别为校正之后第 n 路的占空比修正值与比值系数。

负载单元也运用DC/DC变换器,经由高频变压器对原、副边予以隔离,同时此单元的控制方法与储能单元相同,在此不再赘述。

1.2.2 集中式控制

电力系统通过结合集中式及分布式两种控制方式,达到对系统中分布式配电网多端口能量路由器的协同控制。基于上小节中对VSC、光伏单元、储能单元及负载单元的分布式控制,分布式配电网多端口能量路由器集中式控制器处于某种工作模式下,保证电力系统中功率和电压的均衡平稳。在集中式控制器应切换工作模式时,借助储能单元与负载单元实施电流追踪控制,迅速降低需切掉并联变换器的出力为零后实施切除处理,亦或是当需切入的并联变换器的出力达到零时将其切入,之后以需要的出力值为依据,迅速将所切入变换器的出力升高^[4]。

在工作模式切换时,直流母线电容将进入直流母线的非平衡能量全部吸收,非平衡能量的高低直接影响母线电压的波动情况,表达式为

$$(P_1 + P_2 + P_3 + P_4)\Delta t = 0.5C(u_{c2}^2 - u_{c1}^2) \quad (2)$$

式中: C 为直流母线电容; P_1 为VSC向直流母线流进的功率; P_2 为光伏单元向直流母线流进的功率; P_3, P_4 分别为储能单元与负载单元向直流母线流进的功率; u_{c1} 为未切换工作模式时的直流母线电压; u_{c2} 为切换工作模式之后的直流母线电压; Δt 为不同单元向直流母线的流进时间。

在工作模式切换时采用本文的协同控制方法可对各个端口功率的实时均衡予以有效保障,降低母线电压的波动,防止以往工作模式切换时由于功率不均衡产生的跳变现象,以及由此现象导致的能量无法匹配、造成母线电压出现跳变等问题,达到无缝切换各种工作模式的目的。因该协同控制方法可实现对直流母线电压与电流的共同控制,故在不同工作模式下,电力系统均具备电压源支撑,因而可保证直流母线电压始终处于固定

值。当储能单元与负载单元的参考电流值为零时,可对二者实施切入与切除处理。当需切除储能单元时,其参考电流值的线性下降控制表达式为

$$I_{1,\text{ref}} = i_1 - k_1(t - t_0) \quad (3)$$

式中: k_1 为电流变换斜率; t 为控制时长; i_1 为在工作模式切换过程中的 t_0 时刻,在工作模式切换前的现实电流稳态值。

当储能单元的现实电流值为零周边阈值的情况下,设置此时的参考电流为零,也就是 $I_{1,\text{ref}}=0$,且 $-e \leq I_1 \leq e, e$ 为正的阈值常量。

VSC始终处于平稳电压下的功率传输工作模式,而光伏单元则持续应用MPPT控制,实现功率输出与经济的最大化^[15]。当在负载单元、储能单元与光伏单元间能量均衡的情况下,即 $P_2 + P_3 + P_4=0$,此时VSC的传输功率 $P_1=0$,能够无缝切入/切除VSC。

将流进母线的方向作为端口功率的正方向,通过功率参考值获取到下一工作模式的电流参考值,可表示为

$$\begin{cases} I_{1,\text{ref}} = -P_3/U' \\ I_{2,\text{ref}} = -P_4/U' \end{cases} \quad (4)$$

式中: U' 为直流母线额定电压; $I_{2,\text{ref}}$ 为负载单元的电流参考值。

在实施工作模式切换时,负载单元与储能单元在统一的变化斜率下电流参考值在前、后两种工作模式稳态参考值间迅速过渡,令整个过渡功率符合 $P_1=0$,为工作模式切换时的直流母线电压平稳与功率均衡提供有效保障。

2 实验仿真分析

通过Simulink构建四端口能量路由器仿真模型,运用本文方法实施协同控制仿真实验,检验本文方法的控制效果。

以其中储能单元模型部分为例,对本文方法中储能蓄电池充放电控制阶段的控制效果实施仿真实验分析。选取锂电池作为储能单元的蓄电池,设置蓄电池的额定容量与电压分别为 $25 \text{ A}\cdot\text{h}$ 与 370 V ,蓄电池与母线侧电容分别为 $80 \mu\text{F}$ 与 $12 \mu\text{F}$,电感为 4 mH ,开关频率为 26 kHz 。首先实施均流控制仿真实验,其中蓄电池的起始SOC为 0.6 ,母线侧所接的直流电源为 730 V ,给定电流值为 12 A ,通过将 0.1Ω 电阻接入其中一路电感内,实现两相电路参数差异化的仿真,在蓄电池恒流

充电过程中,分别对未应用本文方法与应用本文方法均流控制后的两相电路电感电流实施仿真对比,结果如图5所示。

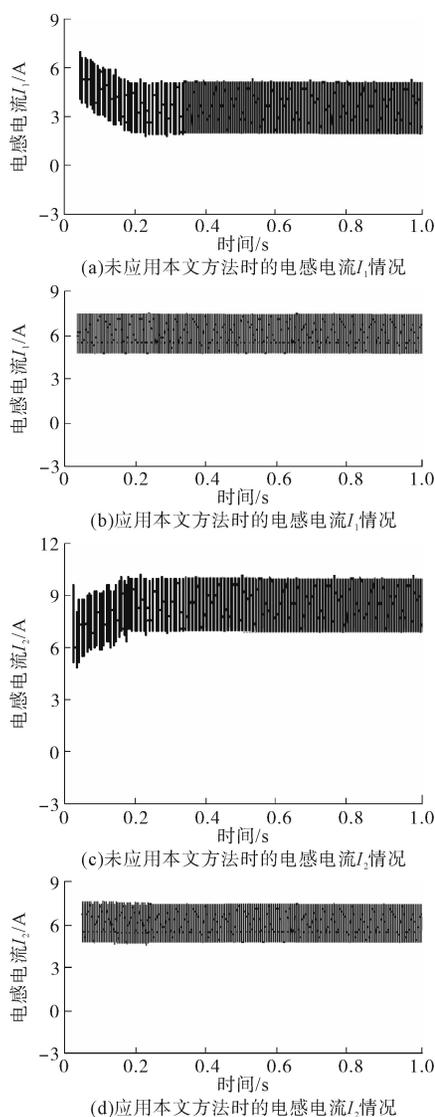


图5 应用本文方法前后蓄电池恒流充电两相电感电流对比
Fig.5 Comparison of two phase inductance current of constant current charging battery before and after using the proposed method

通过图5能够看出,在未应用本文方法实施控制时,蓄电池恒流充电过程中两相电路的电感电流存在显著的差异性,呈现出十分明显的电流不均问题;而在应用本文方法实施均流控制下,蓄电池恒流充电过程中两相电路的电感电流几乎一致,可见本文方法可有效控制蓄电池恒流充电,实现两相电路充电电流的均衡。

继续对本文方法控制下蓄电池的恒压充电与恒压放电实施仿真实验,其中在恒压充电时蓄电池的SOC为0.8,给定的充电电压值为413V,恒压充电的仿真结果如图6所示。

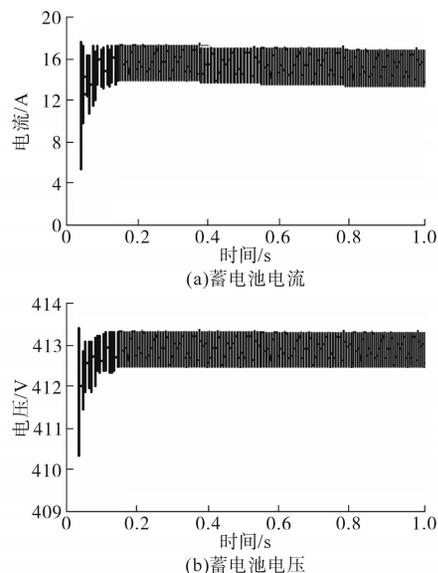


图6 本文方法控制下蓄电池恒压充电仿真结果

Fig.6 Simulation results of battery constant voltage charging under the control of the proposed method

由图6能够得出,在本文方法的控制下,蓄电池恒压充电过程中蓄电池充电电流呈现出轻微的降低趋势,蓄电池端电压始终处于413V上下,无明显浮动趋势,由此可见,本文方法可实现对储能单元蓄电池恒压充电的控制,控制效果显著。

实际应用判别蓄电池健康状态的方法目前只有IEEE推荐的标准,其认为当蓄电池的负载值增加20%以上时应考虑对此单元电池采取纠正或更换措施。因此,当恒压放电时蓄电池SOC为0.85,通过随机调整负载来进一步验证本文方法的控制能力。为此,在0.6s时将负载由104.79Ω调整至149.11Ω,负载变化量为44.32Ω,满足负载值增加20%以上这一条件。本文方法控制下蓄电池的恒压放电仿真结果如图7所示。

通过图7能够得知,在本文方法的控制下,蓄电池恒压放电过程中母线电压在0.6s(负载调整时)出现小幅度升高趋势,但之后快速恢复到平稳状态;蓄电池充电电流较为平稳,蓄电池端电压略有降低,但幅度不明显,可见,本文方法可准确有效地控制储能单元蓄电池的恒压放电过程。

以整体能量路由器模型为例,对本文方法控制下的能量路由器工作模式切换过程实施仿真实验,检验本文方法控制下的工作模式切换效果。实验中,在0.8s之前能量路由器对配电网调度馈电予以响应,此工作模式下未接入负载,光伏出力和储能放电同时向配电网馈电,对配电网予以支撑;在0.8s时将负载接入;当时间到达1.6s

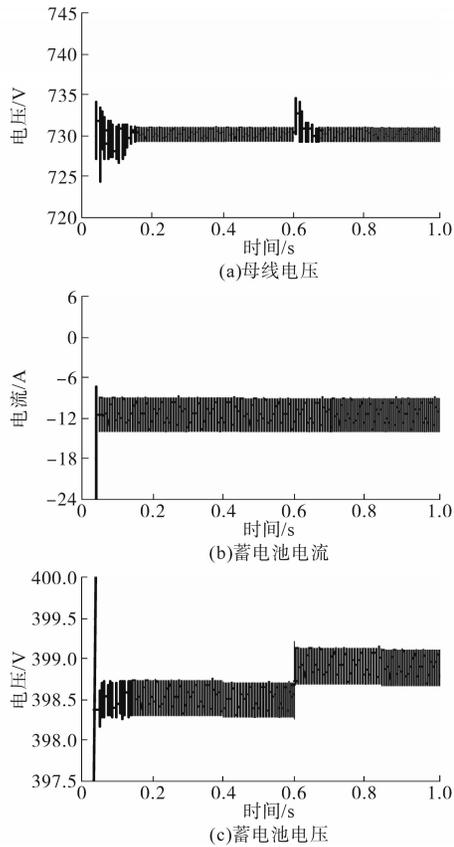


图7 本文方法控制下蓄电池恒压放电仿真结果

Fig.7 Simulation results of battery constant voltage discharge under the control of the proposed method

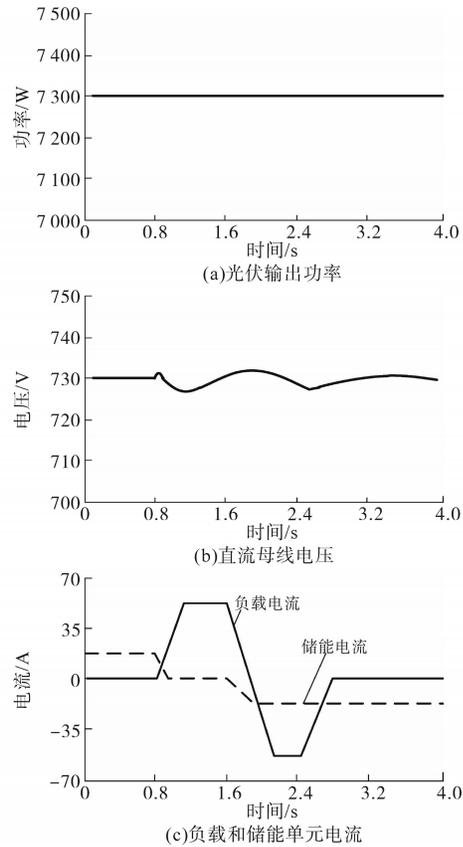


图8 本文方法控制下工作模式切换过程仿真结果

Fig.8 Simulation results of working mode switching process under the control of the proposed method

时,将馈电模式的配电网调度调整成吸收电能模式,这时负载依然存在,同时可为其充电;当时间到达2.4 s时,保持之前的配电网调度指令,将负载切除。本文方法控制下能量路由器工作模式切换过程中的光伏输出功率、直流母线电压、负载和储能单元电流变化情况仿真结果如图8所示。

分析图8可得出,在0.8 s之前,此期间光伏输出功率始终保持为7 300 W,直流母线电压始终保持为730 V,且二者均平稳无波动;在0.8 s时,负载被接入,此时因遭受到VSC容量的制约,负载和光伏同时馈电,储能单元的放电电流逐步下降;当时间到达1.6 s时,因调度指令由馈电转变成吸电模式,负载和储能单元共同实施充电,二者的充电电流逐步升高;当时间到达2.4 s时,由于负载被切除,负载的充电电流缓慢下降至0,储能单元仍然保持恒定电流继续实施充电;除此之外,在整个能量路由器工作模式切换过程中,直流母线电压的波动始终未超出0.4%,说明在本文方法的控制下,可实现能量路由器的多工作模式无缝切换,同时保证切换过程中的直流母线电压平稳与功率均衡。

3 结论

本文针对一种分布式配电网多端口能量路由器协同控制方法展开研究,选取包含并网接口、储能蓄电池接口、负载接口及光伏接口的分布式配电网四端口能量路由器拓扑结构作为协同控制对象,结合分布式与集中式两种控制方法,设计包括调度层、微网控制层与本地控制层的分层协同控制方法架构,无缝切换各种工作模式,实现各工作模式的协同运行,同时保障工作模式切换过程中直流母线电压的平稳与功率的均衡,达到对分布式配电网多端口能量路由器协同控制的目的。

仿真实验结果表明,本文方法可有效控制多端口能量路由器中储能单元蓄电池恒流充电,实现恒流充电过程中两相电路充电电流的均衡;能够准确有效地控制储能单元蓄电池的恒压充电与恒压放电过程,保持恒压充、放电过程中蓄电池电流、电压的平稳,以及恒压放电过程中母线电压的稳定;在能量路由器实施多工作模式切换过程中,应用本文方法控制后,可保障切换过程