

# 基于通用电能路由器的微电网架构及其控制方法

葛健<sup>1</sup>, 杨晨<sup>1</sup>, 杨景刚<sup>2</sup>, 张中锋<sup>1</sup>, 祁琦<sup>1</sup>, 谢晔源<sup>1</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**在中压直流作为电源的交直流混合微电网中, 低压公共交直流母线为多变流器的接入提供了稳定电压。微电网通过配置电能路由器, 构建低压交直流母线电压, 在保障交直流系统故障隔离的前提下, 可实现交直流系统功率的双向传输, 提升了新能源的消纳, 同时还可提高混合微电网的运行可靠性。文中提出基于通用电能路由器单元的低压微电网系统拓扑, 设计了电能路由器的端口配置及控制模式, 优化了电源与电网的接入, 通过多机并联控制策略, 有效解决了多电源并联运行稳定性问题, 研究了变换器的电压一次调节、二次调节及微电网控制模式快速转换的控制方法, 可有效丰富配电网的运行方式, 优化光伏、风电等新能源的消纳路径。

**关键词:**通用电能路由器; 微电网拓扑; 多机并联; 二次调节; 模式转换

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)01-0123-08

## 0 引言

直流微电网仅需控制直流电压的稳定即可平衡系统功率, 控制策略简单, 运行效率较高, 供电可靠, 电能质量高<sup>[1]</sup>。随着新能源、充电桩等直流设备的发展, 中压柔性直流配网的研究得到较大关注<sup>[2-3]</sup>。直流变压器是连接中压柔性直流系统与低压直流电网的重要设备, 文献[4-5]提出基于模块化输入、输出串联的双有源桥控制拓扑直流变压器, 并对移相控制策略进行了研究。但是直流微电网母线接入多电压等级的需求尚处于研究阶段, 迫切需要能接入中压直流配网系统的满足多电压等级接入的电能路由器 (electric energy router, EER)。

文献[6-7]对低压直流 EER 各端口变换器进行了配置, 未设计中压直流端口; 文献[8]分析了 EER 配电网应用的技术要求, 但未涉及具体端口设计及控制方法; 文献[9]设计了带中压交流端口的 EER, 对交流母线电能质量要求高, 运行可靠性较低; 文献[10]研究了 EER 端口的协调控制及交流电网端口的无缝并离网切换, 未能对新能源及储能端口进行统一优化设计; 文献[11]提出五端口能量路由器端口间的潮流转供及储能对系统自稳定的控制, 系统复杂, 运行模式多, 难以在配网推广; 文献[12]对直流微电网的分层协调控制策略进行了研究, 但对直流母线电压的控制要求较高。综上, 满足接入中压柔性直流系统的交直流混联且能直接接入光伏/储能设备的通用 EER 的设计研制较少。

文中提出一种能接入中压柔性直流系统的通用四端口 EER, 并建立基于通用四端口 EER 的微电网拓扑, 介绍通用 EER 的设计及其控制方法; 然后从系统角度对并离网运行转换的控制方法进行了研究; 最后通过现场工程试验验证了文中并网转离网转换过程及 EER 端口功率调节的可行性和有效性。

## 1 基于通用 EER 的微电网拓扑

典型直流微电网的拓扑, 包括基于低压变流器 (power conversion system, PCS) 的直流微电网拓扑<sup>[1,13]</sup>和基于电力电子变压器 (power electronic transformer, PET) 的直流微电网拓扑<sup>[14-16]</sup>, 分别如图 1、图 2 所示。

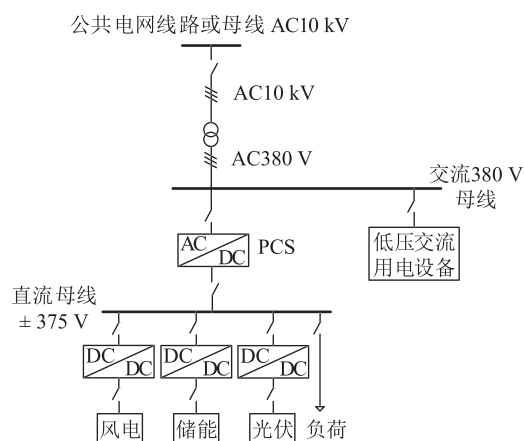


图 1 基于低压 PCS 的直流微电网拓扑

Fig.1 DC microgrid topology based on the PCS

图 1 中, 直流微电网的并网点为工频变压器低压侧 380 V 经低压 PCS 设备转换得到的低压直流

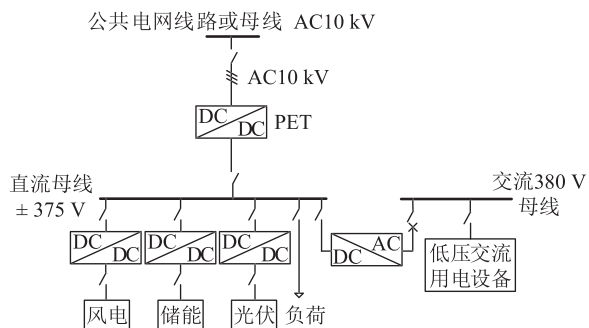


图2 基于PET的直流微电网拓扑

Fig.2 DC microgrid topology based on the PET

接口。图2中,直流微电网的并网点为接入交流10 kV配电网的PET转换形成的低压直流接口。图1直流微电网存在工频变压器且一般380 V电压等级还挂接其他负荷,导致PCS的交流侧系统电能质量较差,PCS的交流380 V侧电网短路容量小,直流系统供电稳定性不高。图2采用基于级联H桥的PET<sup>[17-18]</sup>,将低压直流直接与10 kV交流系统连接,增强了低压直流与10 kV交流系统的电气联系,抗扰动能力较强,但单套PET的容量有限,且此变换器的开关管较多,设备成本较大,限制了该拓扑的使用。

结合现有中压柔性直流系统,文中提出交直流混合微电网通过柔直换流器接入交流10 kV/20 kV的网架,见图3。柔直换流器将交流10 kV或20 kV转换为直流±10 kV的公共母线或直流接入点,微电网主设备通用EER的±10 kV端口直接接入柔直提供的直流±10 kV接入点,此时,低压直流母线可以直接通过EER与中压直流±10 kV系统连接。

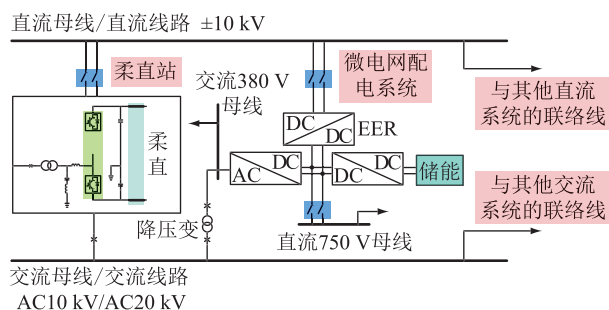


图3 基于EER的微电网接入网架

Fig.3 Main wiring containing the microgrid based on the EER

相比于图1和图2的拓扑,通用EER的中压端口无需进行交流-直流(AC-DC)转换,简化了控制系统,提升了效率,且中压直流侧电能质量较好,提升了微电网并网运行的可靠性。此外,文中提出微电网拓扑基于通用EER对潮流进行柔性控制,EER的4个端口可方便地实现中压直流、低压直流、低压交

流的转换,实现功率互供及故障隔离,且便利了新能源及储能设备的接入。

在微电网内部,通用EER的详细拓扑结构如图4所示。其中,基本EER单元包括AC380 V端口、DC750 V端口、DC±10 kV端口及通用DC-DC端口。中压柔直系统输出接入EER的DC±10 kV端口,实现与EER其他端口的功率互供;交流380 V系统主要由EER的AC380 V端口提供系统电压;低压750 V直流系统主要由EER的DC750 V端口提供系统电压;储能/光伏接入通用DC-DC端口,当此端口接入光伏电池板时,可修改配置为单向变流器。

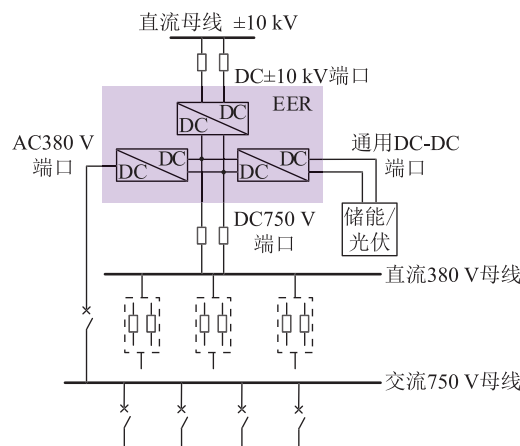


图4 基于通用EER的微电网拓扑

Fig.4 Microgrid topology based on universal EER

基于通用EER的微电网拓扑特性如下:

- (1) EER单元所有端口均可具备功率的双向流动能力;
- (2) 低压交直流系统的短路能力主要由EER的AC380 V端口及DC750 V端口来提供;
- (3) EER单元的端口间具备故障隔离能力,单端口故障不影响其他端口运行;
- (4) 采用通用EER上层协调控制装置实现协调控制自身各端口运行的基本功能同时,还可配合微网控制器执行上层优化控制策略。

与典型的直流微电网比较,基于EER的微电网集成度较高,容易实现分层控制策略,控制层级清晰,系统拓扑简单清晰。同时,通过运行模式的转换及多套EER的协调供电,系统运行方式切换灵活,运行可靠性高。

## 2 通用四端口EER内部模块的控制

EER采用分层控制策略,每个子模块配置1个控制单元,包括直流变压器控制装置、通用变流器DC-DC控制装置、DC-AC变换器控制装置和DC-DC变换器控制装置,实现模块基本起停、控制模式切

换、底层电压功率控制等逻辑,底层电压控制可实现对母线电压的快速控制。

子模块的控制采用分布式控制单元实现,上层配置 EER 协调控制装置,通过组网实现对子模块分布式控制单元的集中式控制。分层控制框架如图 5 所示。

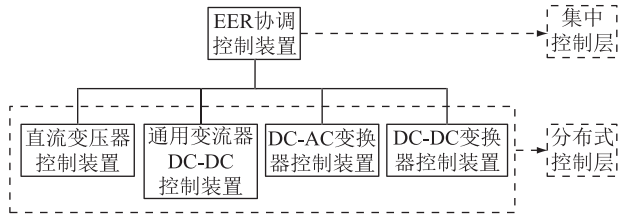


图 5 EER 分层控制架构示意

Fig.5 Schematic diagram of layered control architecture of the EER

EER 控制目标:

- (1) 内部直流母线的电压稳定控制;
- (2) 各端口模式的管理;
- (3) 内部直流母线电压控制电源的功率协调;
- (4) 输出端口电压/功率的控制。

### 2.1 各端口内部模块控制模式管理

正常运行时,EER 内部直流母线电压由直流变压器及储能电池供电的通用变流器协调控制。直流变压器和储能变流器运行于电压控制模式。

直流±10 kV 端口由直流变压器构成,输入为直流±10 kV 电压,输出为直流 750 V 电压,拓扑采用适用于柔性直流配电网的模块化输入串联输出并联双有源全桥型(dual active bridge, DAB)直流变压器方案。变换器拓扑如图 6 所示。

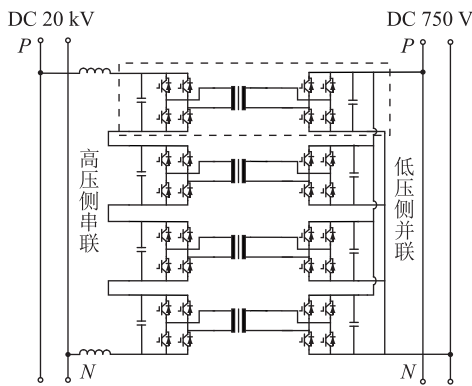


图 6 EER 直流变压器拓扑

Fig.6 Topology of the DC transformer in the EER

DAB 功率模块通过调节前级全桥和后级全桥之间的移相占空比  $\theta$ 。实现对有功功率的调节,其中  $\theta$ 。表示前后级全桥对应开关管开通时间差与半开关周期的比值。

通用变流器端口可接入储能,为提升变换器容

量且满足功率双向传输需求,采用三相全桥结构拓扑,可等效为 3 个 Boost 变换器的并联,变流器拓扑如图 7 所示。

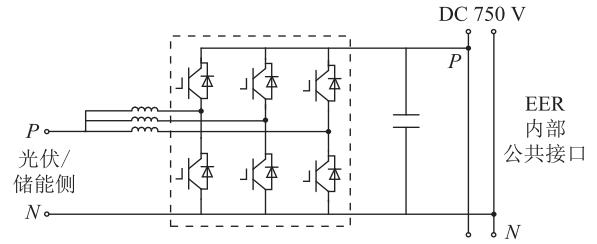


图 7 EER 通用变流器拓扑

Fig.7 Topology of the universal converter in the EER

DC-AC 变流器采用三相全桥拓扑(全桥模块见图 7 虚线框),三相电抗器的输出接入至三相交流系统,为交流 380 V 系统供电,为实现故障电流注入、多机并联及仅 DC-AC 供电时交流系统的稳定,采用交流虚拟同步机控制(virtual synchronous generator, VSG)模式。

DC-DC 变流器模块与图 7 通用变流器端口拓扑相同,为直流系统供电,运行于控制母线侧电压的直流电压模式。当出现系统故障时,控制器将切换运行模式,保障 DC-DC 变流器输出固定大小的短路电流。

### 2.2 直流变换器多机并联控制策略

以 EER 内部直流变压器及储能变流器并联为例进行分析。

2 个直流变流器协调运行时,为实现系统直流电压的稳定控制及稳态时多机的功率均衡,提出了基于下垂控制模式的协调电压控制策略<sup>[18-23]</sup>。

直流变流器的电压参考值由 EER 下发,当系统空载运行时,直流变流器的电压参考值相同,2 套直流变流器的输出功率总和为 0,如图 8 所示。2 套直流变流器都运行于功率点(0,  $U_i$ ),  $U_i$  为电压参考值。

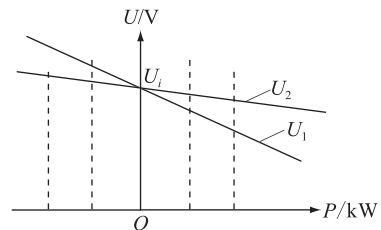


图 8 直流变换器下垂特性曲线

Fig.8 Droop characteristic curves of the DC converter

随着系统逐渐带载,系统运行电压下移,可推得:

$$U_1 = U_i - P_1 k_1 \quad (1)$$

$$U_2 = U_i - P_2 k_2 \quad (2)$$

$$P_1/P_2 = k_2/k_1 \quad (3)$$

式中:  $k_1, k_2$  为下垂系数, 定义下垂系数  $k_i = \Delta U_i / \Delta P_i$ 。

由式(1)一式(3)得出, 在未有协调控制时, 2套直流电压变换器的输出功率与其下垂系数成反比, 下垂系数越大, 输出的功率越小。系统最终稳定的电压与输出功率的关系如下:

$$U_1 = U_i - P_{\text{sum}} k_1 k_2 / (k_1 + k_2) \quad (4)$$

式中: 2套变换器的功率和为  $P_{\text{sum}}$ 。

因系统电压要求在变换器的输出容量内变化时, 波动需控制在一定范围。故而下垂系数设定值一般不能太大, 下垂系数  $k$  的计算方法如下:

$$k_i = \Delta U_i / \Delta P_i \quad (5)$$

$$\Delta U = Pk \quad (6)$$

$$k = |\Delta U_{\text{max}}| / P_N \quad (7)$$

直流变压器的控制环路如图9所示, 其中采用的电压-电流下垂特性推导方式可参考式(1)一式(7)。

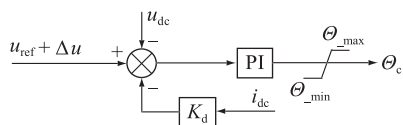


图9 直流变压器电压控制环路

Fig.9 Voltage control loop of the DC transformer

图9中,  $\theta_c$  为移相全桥前级开关与后级全桥开关控制脉冲的移相占空比;  $K_d$  为下垂系数 ( $K_d = |\Delta U_{\text{max}}| / I_N$ );  $u_{\text{ref}}$  为电压参考值;  $\Delta u$  为上层协调控制下发的电压参考值偏移量。

$\theta_c$  与变换器的有功功率  $P$  输出成正比, 以正向功率为例, 单个 DAB 的传输功率与移相占空比  $\theta_c$  之间的关系可以表示为:

$$P_o = \frac{nu_{\text{in}} U_o}{2f_s L} \theta_c (1 - \theta_c) \quad 0 \leq \theta_c \leq 0.5 \quad (8)$$

在储能直流变换器的控制中, 变换器可等效为3个 Boost 变换器的并联, 采用电压外环电流内环结构, 控制环路如图10所示, 其中, 输出  $D$  为变换器开关管驱动脉冲的占空比。图10中采用的电压-电流下垂特性推导方式可参考式(1)一式(7)。

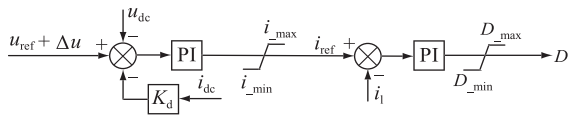


图10 通用变频器电压控制环路

Fig.10 Voltage control loop of the universal converter

### 2.3 上层协调控制层实现单端口功率调节

DC-AC 模块运行于 VSG 控制模式时, 其输出功

率由交流系统的功率平衡来调节, 若交流系统有其他电源, 可通过调节本机 DC-AC 的频率参考值来实现功率调节。

DC-DC 变流器运行于直流电压控制模式, 其输出功率由直流系统的功率平衡来调节, 若直流系统有其他电源, 可通过调节本机电压参考值来实现功率调节。

2套直流电压变换器协调控制内部直流电压时, 为保障系统电压的稳定控制, 直流变换器的功率调节采取慢速调节方案, 调节方式为调节变换器的直流电压参考值。

通过2.2节中差异化设置电压下垂系数, 可在暂态时均衡输出每套变换器的功率, 容量大的输出功率大。

对于 EER 内部模块的功率精确调节<sup>[23-24]</sup>, 可通过慢速功率调节环来实现, 以直流变压器为例, 控制环路设计如图11所示。

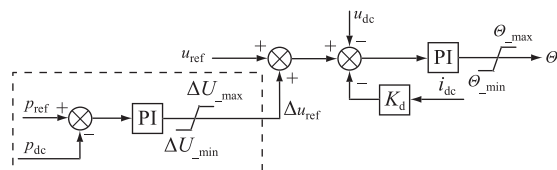


图11 直流变换器功率调节控制环路

Fig.11 Power regulation loop of the DC converter

图11中, 功率环的输入为功率参考值  $p_{\text{ref}}$  和变换器功率输出实际值  $p_{\text{dc}}$ 。功率环的输出为对直流变换器电压参考值的二次调节量, 输出为正则增大电压参考值, 变换器的功率输出增加。

为实现电压的二次调节, EER 上层协调控制装置设置二次调节控制环, 当内部母线带负荷过重导致系统电压低于设定值 ( $u_{\text{ref}}$ ) 较大时, 增加下发直流变流器的电压参考值, 可实现系统电压的二次精确调节。EER 上层协调控制器控制如图12所示, 其中,  $p_{\text{ref}_n}$  为下发第  $n$  套直流变换器的功率指令;  $\Delta u_{_n}$  为下发第  $n$  套直流变换器的电压参考值偏移量指令。

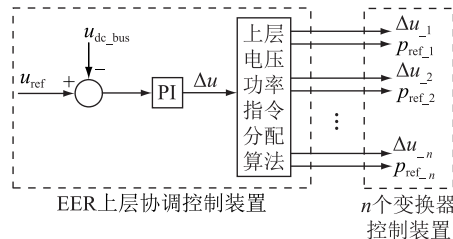


图12 EER 上层协调控制逻辑

Fig.12 Upper layer coordination control logic of the EER

### 3 并网切换微电网的潮流控制方法

以 EER 为单元的交直流混合微电网,在主供电端口 $\pm 10$  kV 直流变压器供电切换为内部储能端口供电时,需要实现对负荷潮流的转移。通过调节 EER 控制储能的功率参考值  $p_{ref}$ ,达到调节储能设备功率输出的目的。图 13 为 EER DC $\pm 10$  kV 端口离网的控制示意。

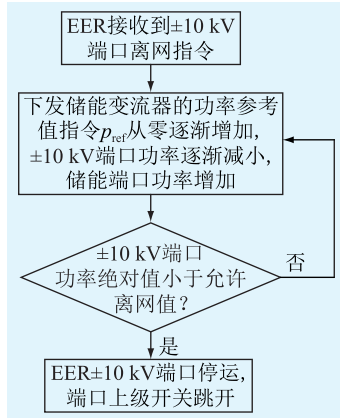


图 13 EER DC $\pm 10$  kV 端口离网控制示意

Fig.13 Control schematic diagram during the off grid of the EER DC $\pm 10$  kV port

图 13 中,通过增大储能功率输出,可以自然地减小主供电  $\pm 10$  kV 端口的功率。当 EER 的  $\pm 10$  kV 端口功率下降到允许停运的范围时,可以下发主动离网指令,从而平滑切换为离网储能供电的微电网系统运行方式。此过程负荷功率平稳,无需变换器执行模式切换操作,系统电压波动较小。

### 4 试验验证

工程实际构建了含有 2 套 EER 的微电网系统,系统主接线如图 14 所示,每套 EER 搭建了 4 端口模块。交直流系统由 2 套 EER 供电,系统中可配置可控负荷协同 EER 完成对系统稳定性的控制。

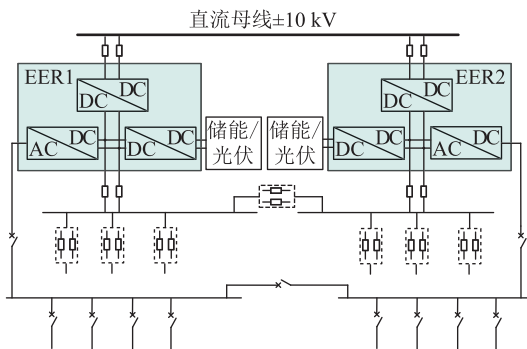


图 14 交直流混合配电网主接线

Fig.14 Main circuit wiring of the hybrid microgrid

控制保护系统的设计思路为分层控制逻辑,系统的控制目标为:(1) 维持系统电压的稳定,实现功率的快速平衡;(2) 实现 2 套 EER 的功率均分;(3) 系统控制模式转换或上层经济运行时,调节系统的运行点。

正常运行时,直流系统的电压由 2 套 EER 的直流变压器模块及直流储能协调控制电压,交流系统的电压由 2 套 EER 的 DC-AC 模块协调控制电压。正常运行时,2 套 EER 的端口容量及运行模式如表 1 所示。

表 1 EER 端口运行参数

Table 1 Port parameters of the EER router

端口	容量/kW	控制模式
$\pm 10$ kV	500	直流电压模式
AC380 V	150	VSG 控制模式
DC750 V	250	直流电压模式 (控系统侧电压)
通用 DC-DC	100	储能为直流电压模式, 光伏为最大功率点 跟踪控制模式

#### 4.1 2 套 EER DC750 V 端口功率均衡控制

直流系统由 2 套 EER 的 DC750 V 端口并列供电时,2 个端口电压参考值和下垂系数设置完全一致。母线上突加负载,记录 2 套 EER 的 DC750 V 端口输出功率波形。稳态时,投入 DC750 V 端口的功率均分策略,观察 2 个端口的功率输出调节情况,记录的功率波形,分别如图 15、图 16 所示。

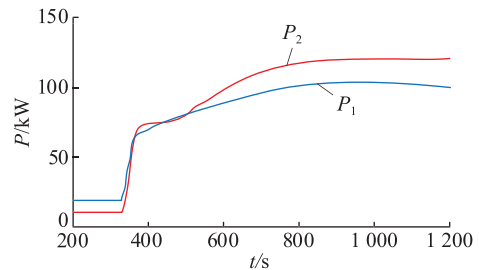


图 15 2 套 EER DC750 V 端口带载功率波形

Fig.15 Power waveforms of two EER DC750 V ports while increasing the load

未投入 2 个端口功率均分策略时,2 套 EER DC750 V 端口输出功率的变化趋势一致,且功率输出差异较小,但因 2 个 DC750 V 端口电压采集存在一定的差异,实际功率输出存在 50 kW 的差异。投入功率均分策略后,通过电压参考值的二次调节,2 套 EER DC750 V 端口输出功率调节至输出一致。

通过波形验证得出,分层控制策略在负荷阶跃时可通过电压控制实时调节快速输出电源功率来维持系统电压的稳定,稳态时通过功率均分策略可

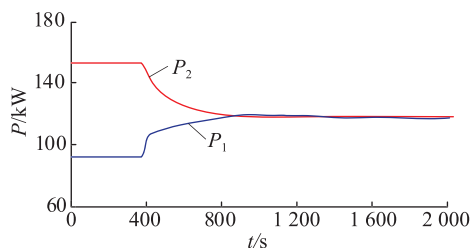


图 16 投入功率均衡策略时 EER DC750 V 端口功率波形

Fig.16 Power waveforms of the EER DC750 V port while applying the power balancing control strategy

实现 2 个端口功率的均衡,从而协调 2 套 EER 的运行效率达到最优,避免产生功率环流。

#### 4.2 正常运行转离网运行功率调节过程

基于 2 套 EER 的交直流混合微电网中,可通过储能、新能源、负荷形成独立自治的运行电网。投入主动并离网切换指令后,EER 自动检测 DC±10 kV 端口功率输出,储能变流器接受到功率调节指令后,调节电压参考值。直流变压器功率降为允许离网功率值后,可执行闭锁变压器操作,实现 EER DC ±10 kV 端口离网。DC±10 kV 端口功率及储能功率波形如图 17 所示,此过程的低压直流母线电压和交流端口电压波形分别如图 18、图 19 所示。

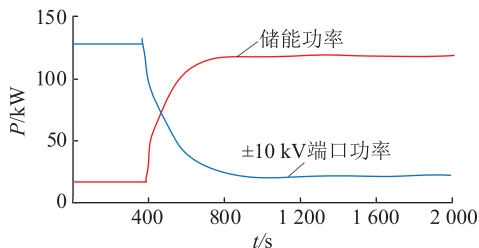


图 17 并网转离网时 EER DC±10 kV 端口及储能端口功率波形

Fig.17 Power waveform of the EER DC±10 kV port and the EER BESS port while the microsystem switches from on grid to off grid

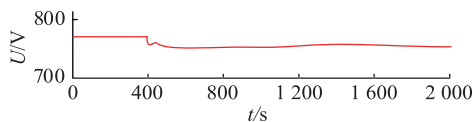


图 18 并网转离网时 EER DC750 V 端口电压波形

Fig.18 Voltage waveform of the EER DC750 V port while the microsystem switches from on grid to off grid

可以看出,负荷的功率逐渐由通用变流器端口的储能设备支撑,DC±10 kV 端口的功率自然降低至允许切除的功率范围以内,保障了主动离网时潮流较小的波动,提升了主动离网的成功率。执行主动离网指令后,负荷功率由 DC±10 kV 端口转供至

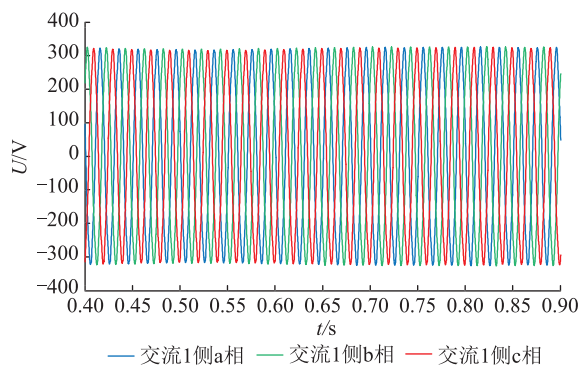


图 19 并网转离网时 EER AC380 V 交流端口电压波形

Fig.19 Voltage waveform of the EER AC380 V port while the microsystem switches from on grid to off grid

储能设备过程,直流母线电压及交流端口电压的波动很小。验证了基于 EER 的微电网中压直流联络线主动离网时,负荷功率可平滑地由 DC±10 kV 端口转移至储能设备,且此过程交直流系统的电压扰动很小。

## 5 结语

文中提出基于通用 EER 的交直流混合微电网的拓扑,对通用 EER 的端口设计和控制策略进行了研究。经工程试验验证,通用 EER 内部电源端口可高效并联,通过功率调节环的电压参考二次调节,可消除变换器采样误差或电压采集点差异导致的功率不均衡。通用 EER 对内部储能端口的功率控制策略,实现了微电网运行方式的平滑转换。

工程现场基于通用 EER 的交直流混合微电网的高效稳定运行,验证了通过 EER 可实现系统运行方式的灵活管理和系统潮流的高效调节。引入 EER 技术后,直流微电网的供电可靠性得到了较大的提升。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019126)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2015,36(6):64-73  
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 36(6): 64-73.
- [2] 赵彪,赵宇明,王一振,等. 基于柔性中压直流配电的能源互联网系统[J]. 中国电机工程学报,2015,35(19):4843-4851.  
ZHAO Biao, ZHAO Yuming, WANG Yizhen, et al. Energy interact based on flexible medium voltage DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4843-4851.
- [3] 戴志辉,黄敏,苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接

- 地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1):1-10.
- DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1):1-10.
- [4] 张中锋, 谢晔源, 许烽, 等. 适用于直流配电网的直流变压器技术研究[J]. 电力电子技术, 2019, 53(5):13-15.
- ZHANG Zhongfeng, XIE Yeyuan, XU Feng, et al. Research on DC transformer technology applied to DC distribution network[J]. Power Electronics, 2019, 53(5):13-15.
- [5] 侯聂, 宋文胜, 武明义. 双向全桥 DC-DC 变换器的负载电流前馈控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9):2478-2485.
- HOU Nie, SONG Wensheng, WU Mingyi. A load current feed-forward control scheme of dual active bridge DC/DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9):2478-2485.
- [6] 段青, 徐嘉超, 盛万兴, 等. 基于级联高频变压器的多端口直流电能路由器[J]. 电网技术, 2019, 43(8):2934-2941.
- DUAN Qing, XU Jiachao, SHENG Wanxing, et al. Multi-port DC electric energy router based on cascaded high frequency transformer[J]. Power System Technology, 2019, 43(8):2934-2941.
- [7] 陈润若, 吴红飞, 邢岩. 一种适用于宽输入电压范围的三端口变换器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27):119-125.
- CHEN Runruo, WU Hongfei, XING Yan, et al. A novel three-port converter for wide-input-voltage-range application[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27):119-125.
- [8] 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.
- ZONG Sheng, HE Xiangning, WU Jiande, et al. Overview of power electronics based electrical energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18):4559-4570.
- [9] 王雨婷. 面向能源互联网的多端口双向能量路由器研究[M]. 北京:北京交通大学, 2016.
- WANG Yuting. Study on multi-port bi-directional energy router in energy Internet[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [10] 孙利, 陈武, 蒋晓剑, 等. 能源互联网框架下多端口能量路由器的多工况协调控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3):32-45.
- SUN Li, CHEN Wu, JIANG Xiaojian, et al. Coordinated control of multiple operation conditions for multi-port energy router in energy Internet framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3):32-45.
- [11] 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.
- LI Zhen, SHENG Wanxing, DUAN Qing, et al. Coordinated control strategy of AC/DC hybrid power router based on voltage stabilization by energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2):121-134.
- [12] 米阳, 吴彦伟, 符杨, 等. 独立光储直流微电网分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8):37-45.
- MI Yang, WU Yanwei, FU Yang, et al. Hierarchical coordinated control of island DC microgrid with photovoltaic and storage system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8):37-45.
- [13] 并网型交直流混合微电网运行与控制技术规范: T/CEC 151—2018[S].
- Specification of operation and control for hybrid AC&DC microgrid connection to grids: T/CEC 151—2018[S].
- [14] 张宸宇, 刘建坤, 葛雪峰, 等. 基于 PET 的直流配电网典型场景及综合能效分析[J]. 电器与能效管理技术, 2019(22):60-67, 76.
- ZHANG Chenyu, LIU Jiankun, GE Xuefeng, et al. Typical scene based on PET and comprehensive energy efficiency analysis of DC distribution network[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(22):60-67, 76.
- [15] 安春秀, 陈怿, 黄达余. 舟山多端柔性直流工程阀厅设计研究[J]. 浙江电力, 2020, 39(1):88-96.
- AN Chunxiu, CHEN Yi, HUANG Dayu. Design of the valve hall of Zhoushan multi-terminal flexible DC transmission project[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(1):88-96.
- [16] 李明琪, 晏寒婷, 董洁, 等. 含多端柔性多状态开关的智能配电网供电能力评估[J]. 浙江电力, 2020, 39(2):10-16.
- LI Mingqi, YAN Hanting, DONG Jie, et al. Total supply capability evaluation of intelligent distribution network with multi-terminal flexible multi-state switch[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(2):10-16.
- [17] 杨艳彬, 李海波, 盛超, 等. 多端口级联式电力电子变压器可靠性评估模型及其应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20):41-49.
- YANG Fenyang, LI Haibo, SHENG Chao, et al. Reliability evaluation model of cascaded multiport power electronic transformer and its application[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20):41-49.
- [18] 石赛美, 刘宪林. 电力电子变压器并联运行动态仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2):20-23.
- SHI Saimei, LIU Xianlin. Dynamic simulation of power electronic transformer in parallel operation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2):20-23.
- [19] 解大, 喻松涛, 陈爱康, 等. 基于下垂特性调节的直流配电网稳态分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12):3516-3528.
- XIE Da, YU Songtao, CHEN Aikang, et al. Steady-state analysis for the DC distribution network with droop-control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12):3516-3528.
- [20] 李福东, 吴敏. 微网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13):18-25.
- LI Fudong, WU Min. An improved control strategy of load distribution in an autonomous microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13):18-25.
- [21] 宋立业, 王兴电. 基于下垂控制的电力电子变压器并联运

- 行策略[J]. 测控技术,2017,36(9):80-85.  
SONG Liye,WANG Xingdian. Parallel operation control strategy of power electronic transformer based on droop control[J]. Measurement and Control Technology,2017,36(9):80-85.
- [22] 李梅航,刘喜梅,陈朋. 适用于多端柔性直流输电系统的快速电压裕度控制策略[J]. 电网技术,2016,40(10):3045-3051.  
LI Meihang,LIU Ximei,CHEN Peng. Fast voltage margin control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Power System Technology,2016,40(10):3045-3051.
- [23] 蒋智化,刘连光,刘自发,等. 直流配电网功率控制策略与电压波动研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(4):919-926.  
JIANG Zhihua,LIU Lianguang,LIU Zifa, et al. Research on power flow control and the voltage fluctuation characteristics of DC distribution networks based on different control strategies [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(4):919-926.
- [24] 朱皓斌,徐光福,侯炜,等. 基于PCS功率越限判据的独立型微电网紧急控制策略[J]. 电力工程技术,2020,39(2):59-65.  
ZHU Haobin,XU Guangfu,HOU Wei, et al. Emergency control strategy of independent micro-grid based on PCS power limit criterion[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(2):59-65.

作者简介:



葛健

葛健(1987),男,硕士,工程师,从事微电网控制技术与链式无功补偿控制技术相关工作(E-mail:gej@nrec.com);

杨晨(1985),男,博士,工程师,从事配网直流变压器相关工作;

杨景刚(1984),男,博士,高级工程师,从事交直流配用电技术及应用相关工作。

### A micro-grid architecture based on universal energy router unit and its control method

GE Jian<sup>1</sup>, YANG Chen<sup>1</sup>, YANG Jinggang<sup>2</sup>, ZHANG Zhongfeng<sup>1</sup>, QI Qi<sup>1</sup>, XIE Yeyuan<sup>1</sup>

(1. NR Electric Co.,Ltd.,Nanjing 211102,China;2. State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd. Research Institute,Nanjing 211103,China)

**Abstract:** Supplied by medium-voltage-DC power source, the AC-DC hybrid microgrid derives a stable AC-DC system voltage which ensures the parallel-operation stability of the multiple converters. The distribution network is configured with energy router to build low-voltage AC-DC system voltage and provide power to the AC-DC loads. Under the premise of ensuring fault isolation of the AC and DC systems, energy router can achieve two-way power transmission of AC and DC power supply, which enhance the consumption of multi-source and improves the reliability of microgrids. A system topology of the low voltage AC-DC hybrid microgrid based on the universal energy router technology is proposed, and the port configuration and control mode of the energy router are optimized. The multi-source parallel control strategy is studied, which effectively improves the stability of multi-source parallel operation. Also the control strategies including primary regulation, secondary regulation and fast conversion of converter control modes, can effectively enrich the operation modes of the distribution network and optimize the consumption path of new energy sources such as photovoltaics and wind power.

**Keywords:** universal energy router; microgrid topo; multi-source parallel; secondary regulation; conversion of converter control modes

(编辑 钱悦)