

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230256

面向新能源接入的电能路由器模式切换协调控制策略

马文忠¹, 邵宇阳¹, 王玉生², 焦丽鑫¹, 金琼婷¹, 张景顺¹

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油天然气股份有限公司规划总院, 北京 100083)

摘要: 电能路由器(electrical energy router, EER)可实现新能源、储能及多种电能负载的灵活接入, 协调控制和运行模式切换是其运行控制的重点。为实现 EER 运行模式的平稳过渡, 降低 EER 运行模式切换时母线稳压单元控制模式改变导致的切换冲击, 首先分析并网和孤岛两种运行模式切换时的电压扰动机理, 研究系统内功率突变以及母线稳压单元控制器的调节过程对系统的影响。然后设计 EER 模式切换时序, 提出一种基于移相比保持器、电流保持器的控制器输出量提前补偿的模式切换协调控制策略, 能够实现端口功率的实时平衡, 降低模式切换暂态过程中的电压扰动, 提升系统的暂态稳定性。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真软件搭建 EER 仿真模型, 验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 电能路由器; 模块化多电平换流器; 功率平衡; 模式切换; 协调控制

Mode switching coordination control strategy of an electrical energy router for new energy access

MA Wenzhong¹, TAI Yuyang¹, WANG Yusheng², JIAO Lixin¹, JIN Qiongtong¹, ZHANG Jingshun¹

(1. Institute of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. PetroChina Planning & Engineering Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: An electrical energy router (EER) can realize the flexible access of new energy, energy storage and a variety of electrical loads. Coordinated control and operational mode switching are the focus of its operation control. To achieve a smooth transition of the EER operating mode and reduce the switching impact caused by the change of control mode of the bus regulator during that mode switching, the voltage disturbance mechanism during grid-connected and isolated operating mode switching is first analyzed. The influence of power abrupt change in the system and the regulation process of the bus regulator controller on the system is studied. Then, the EER mode switching sequence is designed, and a coordinated mode switching control strategy based on the advance compensation of the controller output of the shift ratio holder and the current holder is proposed. This can achieve real-time port power balance, reduce voltage disturbance in the mode switching transient process, and improve the transient stability of the system. Finally, an EER simulation model is established in Matlab/Simulink simulation software to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277208).

Key words: electrical energy router; modular multi-level converter; power balance; mode switching; coordinated control

0 引言

随着能源紧缺以及环境污染问题的日益严重, 以光伏、风电为代表的新能源发电以及大规模储能系统接入电网, 使配电系统存在着较强的随机性和不确定性, 电能的单向流动也向多向流动转变, 传统配电系统自治能力较差, 难以对功率流动进行连

续精准的调节^[1-2]。随着能源互联网概念的提出, 电力系统逐步向着“源-网-荷-储”协调优化的交直流混合配电网发展, 而电能路由器(electrical energy router, EER)作为能源互联网的核心设备, 能与上层系统协调, 具有电能变换、故障隔离、即插即用等功能, 对其进行研究有重要的理论意义和工程实用价值^[3-8]。目前针对 EER 的研究主要在拓扑结构^[9-11]、控制策略^[12-14]、端口间协调控制^[15-17]、优化运行^[18-19]等方面。随着电力系统的发展, 系统正向着多直流

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277208)

母线、多功率流向的交直流混合配电发展, 基于模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)的EER能提供中压直流端口, 更适合未来中低压配电网发展的需要^[20]。

通过将新能源接入 EER 不仅能将清洁电能用于区域负荷, 并且冗余功率可流入储能单元和交流主网, 缓解新能源消纳问题。然而 EER 并网换流器需要定期检修, 适时将 MMC 切出停运, 进入孤岛运行模式, 此时 EER 功率单元及新能源须保证系统内重要负荷不间断运行; 检修结束后, 重新投入 MMC, 恢复并网运行模式。针对系统的模式切换方法: 文献[21]提出始终采用储能控制低压配电网中 EER 的直流母线电压, 无需模式切换, 但对储能容量有较高要求, 因此提高了建设成本, 难以扩展至电压等级更高的中压配电网; 文献[22]提出一种 EER 的多工况协调控制策略, 实现了工况间的无缝切换, 但其面向的仍是低压配电网, 系统架构较为简单。文献[23]提出一种交直流微电网中电力电子变压器的模式切换方法, 降低了模式切换时的暂态扰动, 但此拓扑为单母线结构, 未涉及中压直流端口的电压控制; 文献[24]提出多母线结构交直流混合微电网模式切换方法, 但其针对的是基于下垂控制的模式切换方法; 文献[25-26]提出基于主从控制的柔性直流配电系统运行模式切换、启停控制的系统层协调控制方法, 但未对模式切换或启停过程中控制器层的暂态冲击问题进行深入研究; 文献[27-29]对微电网及配电网中单一换流器的控制器层模式切换进行了研究, 但未考虑多类变换器工作模式均须切换更复杂系统的场景; 文献[30]提出馈线故障时柔性多状态开关的多端口模式切换方法, 但未涉及端口停运时的模式切换策略。

本文针对新能源及多类储能接入、面向中低压直流配电的多电压等级 EER 运行模式切换及切换过程的暂态冲击问题, 研究 EER 模式切换的电压扰动机理, 设计 EER 运行模式切换时序, 保证 EER 各端口功率实时平衡; 提出一种基于移相比保持器、电流保持器的控制器输出量提前补偿的模式切换协调控制策略, 通过对母线稳压单元控制器的输出量进行提前补偿, 有效降低控制模式切换产生的不利影响, 提升系统的暂态稳定性。

1 EER 系统架构

以光伏和储能系统接入 EER 为例, 利用多种变换器通过直流母线相互级联, 其架构如图 1 所示。图中: QF_1 为 MMC 直流侧断路器; P_{Grid} 为网侧功率; P_{MVPV} 、 P_{LVPV} 分别为中、低压光伏输出功率; P_{DCT}

为直流变压器(direct current transformer, DCT)传输功率; P_{Load} 为交直流负荷消耗功率; P_{Bat} 为蓄电池输出功率; P_{SC} 为超级电容器输出功率。

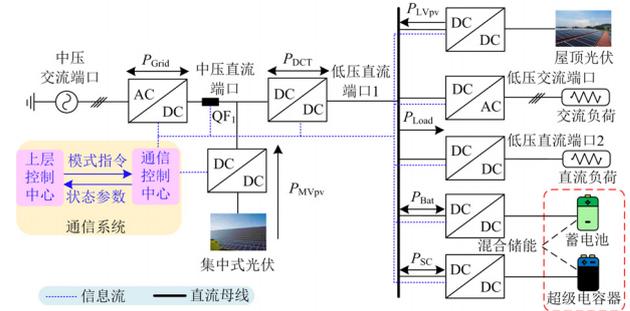
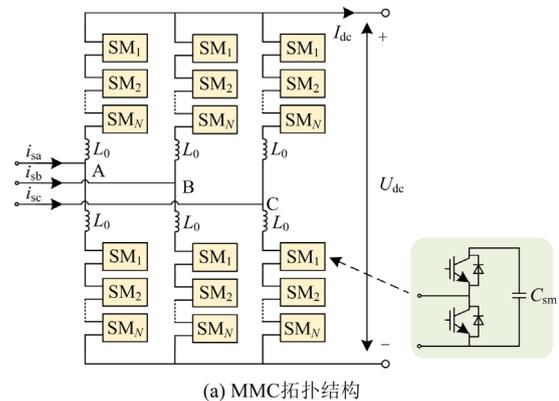


图 1 电能路由器基本架构

Fig. 1 Basic structure of EER

图中黑线绘制部分共同组成基于电力电子技术的 EER 功率单元, 由多级电力电子变换单元构成, 其经过中间变换得到的直流母线可引出多类接口, 以方便多种能源的集成接入。EER 的并网端口采用 MMC 与电网连接, 集中式光伏通过直流升压接入中压直流母线, 输入串联输出并联隔离型 DCT 连接 EER 的中低压直流母线, DCT 由 m 个双有源桥式(dual active bridge, DAB)变换器级联而成, MMC 和 DCT 的拓扑结构如图 2 所示, MMC 每相由 $2N$ 个子模块构成, i_{sj} ($j = a, b, c$ 相) 为网侧电流, U_{dc} 和 I_{dc} 为 MMC 直流侧电压和电流, L_0 为桥臂电感, C_{sm} 为子模块电容, T 为高频隔离变压器, 变比为 $n:1$, L 为等效漏感, U_{MV} 、 U_{LV} 分别为 DAB 中、低压侧电压。为解决孤岛模式下的中低压新能源消纳问题, 在低压直流母线并入混合储能(hybrid energy storage system, HESS)单元。

图 1 中蓝色虚线为 EER 的信息流控制, 通信系统可对 EER 内部多个功率单元进行功率控制和状态参数采集, 同时接受并响应上层控制中心的模式切换指令。



(a) MMC 拓扑结构

能, 而蓄电池容量有限, 若达到蓄电池放电电流限值, 则应根据负荷优先次序进行主动切负荷; 同理若达到蓄电池充电电流限值, 光伏应工作于限功率模式, 降低输出功率, 保证 EER 的稳定运行。

2.3 运行模式切换产生的问题

EER 模式切换涉及多个端口间的协调控制与时序配合, 需要母线稳压单元及时切换控制模式, 以保证直流母线电压的稳定。

然而在 EER 模式切换时: 一方面, 若 MMC 直接切出或投入, 母线稳压单元的输出功率突变将对控制器切换的暂态过程产生较大扰动; 另一方面, 控制器在由原控制模式切换至目标控制模式时, 若目标控制模式控制器在未切换前就已介入, 输入误差会经过积累放大, 在切换时刻产生冲击, 无法实现模式的平滑切换, 此外模式切换瞬间控制器输出量需要重新调节, 调节过程容易造成直流母线电压振荡, 诱发系统失稳, 从而降低 EER 模式切换时的暂态稳定性。

由上述分析可知, 在 EER 并网、孤岛模式切换时, 如能避免系统内功率突变和目标控制器提前介入, 同时对母线稳压单元控制器的输出量进行提前补偿, 减小控制器之间的状态差, 即可基本消除切换瞬间产生的电压扰动, 实现模式的平滑切换, 从而提升系统的暂态稳定性。

3 EER 模式切换协调控制策略

3.1 MMC 控制器模式切换控制策略

为实现控制器控制模式的平稳切换, 首先需要设计 EER 运行模式切换时序, 以避免系统内功率突变, 为后文控制器输出量提前补偿奠定基础。

下面以 EER 由并网模式切换至孤岛模式, 再重新恢复至并网模式为例, 模式切换时序如图 5 所示, 图中 U_s 、 Z_s 分别为网侧电压及网侧串联阻抗。

1) 上层控制中心发出孤岛指令, 母线稳压单元切换控制模式, MMC 以直接功率控制功率线性下降, DCT 切换至定中压控制, HESS 切换至分频下垂控制, EER 进入孤岛过渡阶段。

2) MMC 功率下降至 0, QF_1 断开, EER 进入孤岛运行模式。

3) 当 EER 需要重新并网运行时, MMC 空载启动, 建立额定直流电压后, 上层控制中心发出并网指令, QF_1 闭合, MMC 采用直接功率控制以零功率投入, 同时根据蓄电池充放电状态向 EER 线性吸收或注入能量, 以降低母线稳压单元控制模式切换时的功率和电压偏差, EER 进入并网过渡阶段。

4) 低压直流母线电压恢复至额定值, MMC 切

换至定电压控制, DCT 切换至定低压控制, HESS 切换至定功率控制并采样保持切换前功率值, EER 恢复并网运行模式。

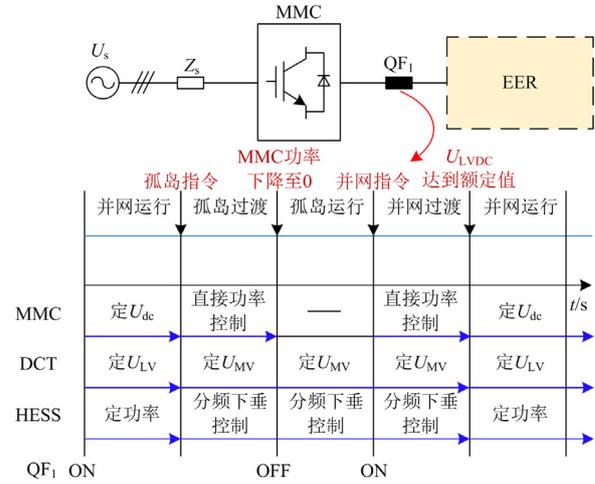


图 5 EER 运行模式切换时序

Fig. 5 EER mode switching sequence diagram

下面对 MMC 控制器模式切换方法进行分析, 由于本文仅涉及 MMC 的 d 轴有功类控制量的切换, 因此其控制结构如图 6 所示, 图中: P_{ref} 为 MMC 功率参考值; i_{sd} 为定电压控制器输出量; i'_{sd} 为 d 轴电流补偿量; i_{dref} 为 d 轴电流参考值; 电流保持器可避免控制器在未介入时输入误差持续积累导致切换时刻造成暂态冲击, 同时维持控制器在开关切换前一时刻的输出量。

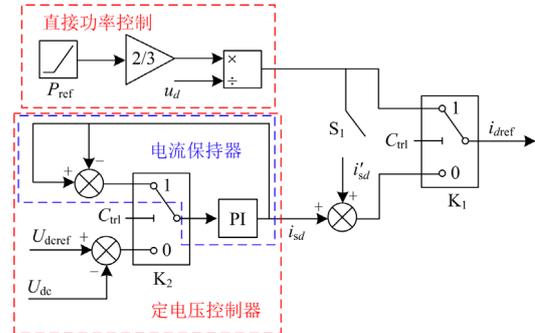


图 6 MMC 模式切换控制结构

Fig. 6 Control structure of MMC mode switching

定电压控制器输出量 i_{sd} 为

$$i_{sd} = \begin{cases} i_{sd}(t-1) & C_{trl} = 1 \\ ((U_{dcref} - U_{dc})G_{pu}) & C_{trl} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i_{sd}(t-1)$ 为开关切换前一时刻定电压控制器输出量; G_{pu} 为定电压控制器 PI 环节传递函数。

并网模式下, 模式开关 K_1 、 K_2 选择通道 0, 开关 S_1 断开, MMC 运行于定电压控制模式。当 EER

需要切换至孤岛运行时, MMC 作为定电压站, 若无任何控制策略的直接切出会导致直流母线电压的剧烈波动, 因此在 MMC 切出前, 模式开关 K_1 选择通道 1, MMC 采用直接功率控制采样上一时刻的功率值来控制功率线性下降, 当 MMC 功率下降至 0 时, QF_1 断开, 切出 MMC。直接功率控制下的 d 轴电流参考值为

$$i_{dref} = \frac{2P_{ref}}{3u_{sd}} \quad (5)$$

MMC 须重新投入时, 模式开关 K_1 、 K_2 选择通道 0, S_1 断开, MMC 首先空载启动, 建立额定直流电压后, QF_1 闭合, 模式开关 K_1 、 K_2 选择通道 1, MMC 以直接功率控制空载投入, 电流保持器可维持上一时刻的输出量不变, 同时 S_1 闭合。设置 MMC 的功率以斜坡函数线性上升, 计算出内环电流的补偿量 i'_{sd} 补偿至定电压控制器, i'_{sd} 计算方法与式(5)中 i_{dref} 的计算方法相同, 则 MMC 内环电流参考值为

$$i_{dref} = i_{sd}(t-1) + i'_{sd} \quad (6)$$

由于 MMC 空载启动, 因此 $i_{sd}(t-1)$ 近似为 0。当低压直流母线电压恢复至额定值时, P_{ref} 停止变化, 模式开关 K_1 、 K_2 选择通道 0, MMC 恢复定电压控制, 即模式切换后定电压控制器将从其稳态输出值开始调节, 缩小了控制器之间的状态差, 因此经过短暂调节即可稳定, 完成切换。

3.2 DCT 及 HESS 控制器模式切换控制策略

1) DCT 控制器模式切换控制策略

DCT 模式切换控制结构如图 7 所示。图中: U_{LVref} 、 U_{MVref} 分别为 DAB 低、中压侧电压参考值; ΔD_L 、 ΔD_M 分别为定低压、定中压控制器的补偿量; D_{Lp} 、 D_{Mp} 分别为定低压、定中压控制器的输出量; D_L 、 D_M 分别为定低压、定中压控制器经补偿后的输出量; 移相比保持器可避免控制器在未介入时, 输入误差持续积累导致切换时刻出现暂态冲击, 同时维持控制器在开关切换前一刻的输出量。

由式(1)可知, DAB 传输同一功率值时, 有两个移相比与之相对应, 为避免移相比补偿导致的功率偏差, 本文设置移相比限幅为 $[-0.5, 0.5]$ 。若切换前后 DAB 两侧电压不变, DAB 在传输大小方向相同的功率值时, 切换控制模式不会改变控制器输出移相比的稳态值。

前文已知 MMC 采用直接功率控制使得功率线性变化, DCT 不存在电压、功率突变, 因此定低压、定中压控制器输出量之间可相互补偿, 从而减小两者切换过程中控制器的状态差, 缩短调节时间, 从而降低由调节过程带来的电压扰动。

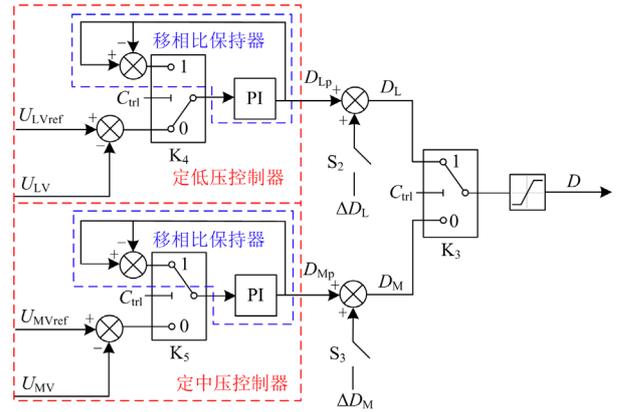


图 7 DCT 模式切换控制结构

Fig. 7 Control structure of DCT mode switching

由图 7 可知, D_{Lp} 、 D_{Mp} 为

$$D_{Lp} = \begin{cases} D_{Lp}(t-1) & C_{tit} = 1 \\ (U_{LVref} - U_{LV})G_{pL} & C_{tit} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$D_{Mp} = \begin{cases} D_{Mp}(t-1) & C_{tit} = 1 \\ (U_{MVref} - U_{MV})G_{pM} & C_{tit} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $D_{Lp}(t-1)$ 、 $D_{Mp}(t-1)$ 分别为开关切换前一刻定低压、定中压控制器输出量; G_{pL} 、 G_{pM} 为 DCT 定低压、定中压控制器 PI 环节传递函数。

并网模式下, 模式开关 K_3 、 K_4 、 K_5 分别选择通道 1、0、1, S_2 断开, S_3 闭合, DCT 运行于定低压控制模式, 定低压控制器工作, 定中压移相比保持器将输出量保持为 0, ΔD_M 为两控制器输出量的状态差, 即

$$\Delta D_M = D_L - 0 = (U_{LVref} - U_{LV})G_{pL} \quad (9)$$

在控制模式切换前, D_M 与定低压控制器实际输出量相等。孤岛模式下, DCT 切换为定中压控制时, 模式开关 K_3 、 K_4 、 K_5 分别选择通道 0、1、0, S_2 闭合, 此时定中压控制器开始工作, 定低压移相比保持器保持切换前数值不变, 式(9)中 ΔD_M 变为定值 $D_{Lp}(t-1)$, D_{Mp} 经补偿 ΔD_M 后, 即为当前时刻的功率匹配值, 因此定中压控制器只需调节二者输出量的误差值, 从而降低控制器调节过程带来的电压扰动。

此时, 补偿至定低压控制器的两控制器输出量之间的差值 ΔD_L 为

$$\Delta D_L = D_M - D_{Lp} = D_M - D_{Lp}(t-1) = (U_{MVref} - U_{MV})G_{pM} \quad (10)$$

当恢复至并网模式时, DCT 重新切换为定低压控制, 模式开关 K_3 、 K_4 、 K_5 分别选择通道 1、0、

1, 此时定低压 PI 控制器开始工作, 定中压移相比保持器保持切换前数值不变, 式(10)中 ΔD_L 变为定值, 其值为 $D_{Mp}(t-1)$, D_{Lp} 经补偿 ΔD_L 后, 其值即为当前时刻的功率匹配值, 因此模式切换前后控制器输出量保持一致, 故经过短暂调节即可稳定, 从而实现了 DCT 控制模式的平滑切换。

2) HESS 模式切换控制策略

HESS 模式切换原理与 DCT 类似, 本文在此不再赘述, 为实现内环电流的连续调节, 本文采用电流内环共用策略, 避免了内环控制器由于参数不一致对切换过程产生的不利影响。

4 仿真验证

为验证所提模式切换控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建了图 1 所示的 EER 仿真模型。表 1 为 EER 系统部分仿真参数。

表 1 EER 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of EER system

参数	数值
配电网电压/kV	10
中压直流母线电压/kV	20
低压直流母线电压/kV	0.75
低压直流端口电压/V	220
低压交流端口电压/V	380
集中式光伏容量/kW	1000
交直流负荷容量/kW	1000
屋顶光伏容量/kW	200
蓄电池最大输出功率/kW	±600
超级电容器最大输出功率/kW	±600
MMC 单桥臂子模块数 $2N$	8
MMC 子模块电容值 C_{sm}/mF	2.5
级联 DAB 数量 m	4
变压器变比 $n:1$	6.67:1
变压器等效漏感 L/mH	2
虚拟电阻 R_d/Ω	0.06
虚拟电容 C_d/F	1.32

4.1 并网模式切换孤岛模式

系统初始状态, 交直流负荷总功率为 600 kW, 光照强度较低, 中压光伏输出功率为 320 kW, 低压光伏输出功率为 85 kW, 蓄电池、超级电容器 SOC 均有一定裕量, 处于备用状态。0.5 s 时, 系统发出孤岛指令, MMC 切换至直接功率控制, 功率线性下降, DCT 切换为定中压控制模式, HESS 切换至分频下垂控制, EER 进入孤岛过渡阶段。0.8 s 时, 网侧功率降至 0, QF_1 断开, EER 进入孤岛运行模式。图 8 为网侧电流波形, 图 9 为中低压直流母线各单元功率波形, 图中 P_{DCTin} 、 P_{DCTout} 分别为 DCT

的输入功率和输出功率。

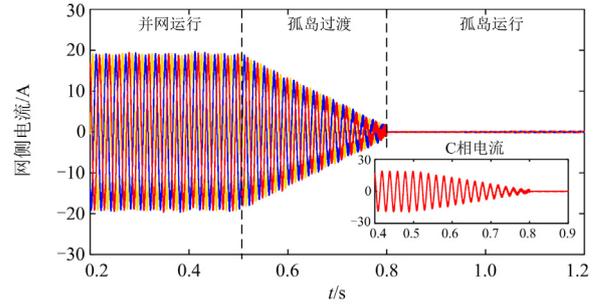
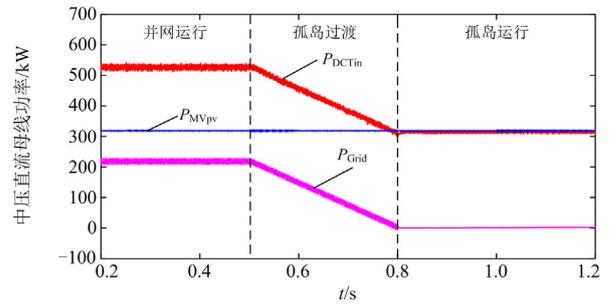
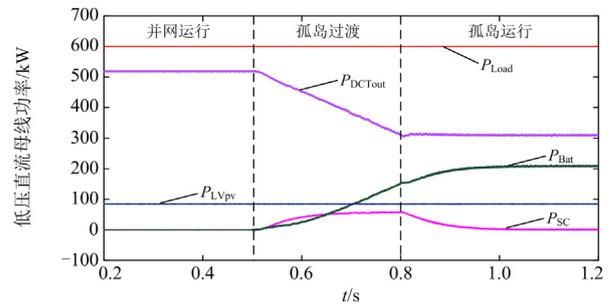


图 8 网侧电流波形

Fig. 8 Waveform of current on the grid side



(a) 中压直流母线功率



(b) 低压直流母线功率

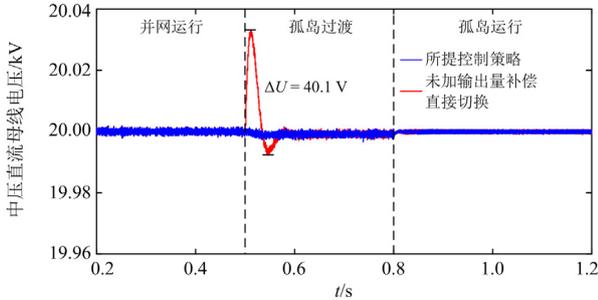
图 9 中低压直流母线功率波形

Fig. 9 Waveform of medium and low voltage DC bus power

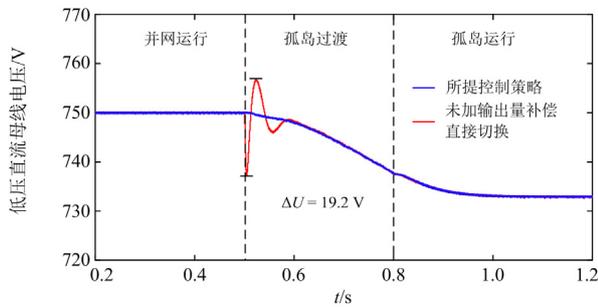
由图 8 可知, 网侧三相电流在孤岛过渡阶段电流逐渐减小, 0.8 s 时, 三相电流降为 0, MMC 闭锁切出。由图 9 可知, 中压直流母线处, 0.5 s 时, 进入孤岛过渡阶段, 此时网侧功率由 220 kW 逐渐降为 0, DCT 的输入功率由 530 kW 逐渐降为 315 kW, 中压光伏输出功率为 320 kW; 低压直流母线处, DCT 的输出功率由 519 kW 逐渐降为 312 kW, 由于 DCT 功率持续线性变化, 超级电容器输出高频功率, 峰值功率为 57 kW, 蓄电池在此阶段持续放电, 功率逐步上升。0.8 s 时, MMC 切出, 此时 DCT 功率保持平稳, 超级电容器功率缓慢下降, 蓄电池最终输出稳态功率 208 kW。在切换的过程中, 系统并未

产生较大的功率波动，较为平稳地由并网模式切换至孤岛模式。

为验证所提模式切换策略的控制效果，对比母线稳压单元控制器模式切换时未加输出量补偿直接切换与所提控制策略下的电压波形，如图 10 所示。



(a) 中压直流母线电压



(b) 低压直流母线电压

图 10 中低压直流母线电压波形

Fig. 10 Waveform of medium and low voltage DC bus voltage

由图 10 可知，0.5 s 时，若 DCT、HES 控制器未加入输出量提前补偿而直接切换控制模式，由于控制器的调节需要时间，中压直流母线出现了 40.1 V 的电压波动，低压直流母线出现了 19.2 V 的电压波动，随后 HESS 逐步调节将电压稳定于 733 V；而所提控制策略中压直流母线电压没有出现大幅波动，低压直流母线电压波形在切换过程中较为平滑，实现了运行模式的平稳切换。

4.2 孤岛模式切换并网模式

系统初始状态，MMC 以定电压控制空载启动，并建立额定直流电压。0.5 s 时，系统发出并网指令，QF₁ 闭合，MMC 切换为直接功率控制，系统检测到孤岛模式下蓄电池处于放电状态，此时控制 MMC 功率线性上升，从电网吸收电能，蓄电池功率缓慢下降，超级电容器吸收这一过程的功率高频分量，低压直流母线电压随下垂曲线缓慢上升，EER 进入并网过渡阶段。0.8 s 时，低压直流母线电压达到额定值 750 V，此时 MMC 恢复定电压控制，DCT 切换为定功率控制模式，HES 切换为定功率控制模

式，并网恢复过程结束，EER 恢复并网运行。图 11 为网侧电流波形，图 12 为中低压直流母线各单元功率波形。

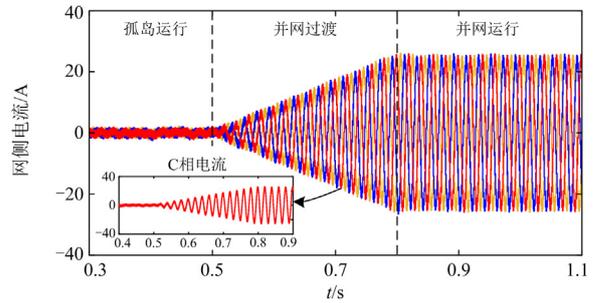
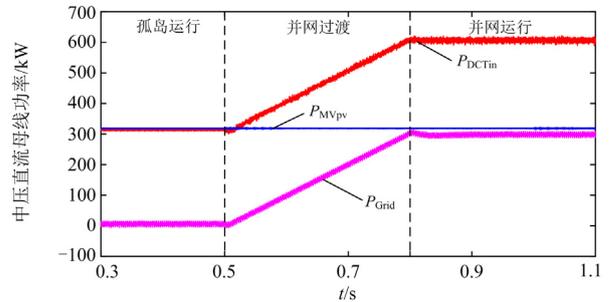
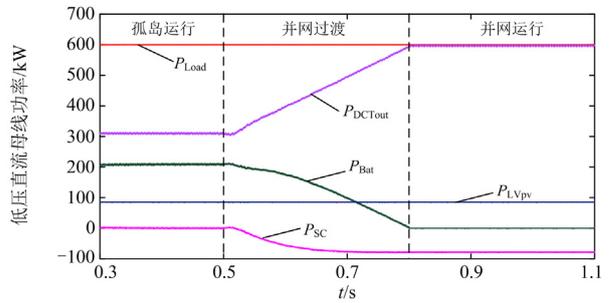


图 11 网侧电流波形

Fig. 11 Waveform of current on the grid side



(a) 中压直流母线功率



(b) 低压直流母线功率

图 12 中低压直流母线功率波形

Fig. 12 Waveform of medium and low voltage DC bus power

由图 11 可知，MMC 空载启动完成，由于仅传输损耗功率，因此电流接近于 0。0.5 s 时，随着功率值逐步提升，在并网恢复阶段电流幅值逐渐提高，在 0.8 s 时达到稳定。由图 12 可知，对于中压直流母线，0.5 s 时，进入孤岛过渡阶段，网侧功率由 0 按照斜坡函数逐渐上升至 300 kW，同时 DCT 输入功率由 310 kW 提高至 610 kW，中压光伏输出功率为 320 kW；对于低压直流母线，DCT 的输出功率由 312 kW 逐渐提升至 597 kW，由于 DCT 传输功率持续线性提升，蓄电池输出功率下降，超级电容

器持续吸收功率高频分量, 峰值为 79 kW。0.8 s 时, HESS 切换控制模式为定功率控制, 蓄电池输出功率降为 0, 在切换过程中, 超级电容器采样并网恢复阶段的功率并保持 79 kW 不变, 以避免功率突变对模式切换产生不利影响。

为验证所提模式切换策略的控制效果, 对比母线稳压单元控制器模式切换时未加输出量补偿直接切换与所提控制策略下的电压波形, 如图 13 所示。

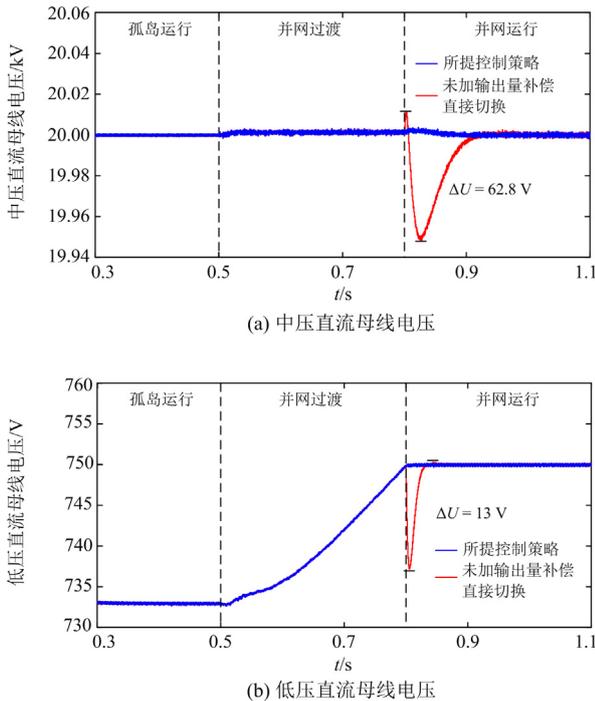


图 13 中低压直流母线电压波形

Fig. 13 Waveform of medium and low voltage DC bus voltage

由图 13 可知, 0.8 s 时, 若 MMC、DCT、HESS 控制器未加输出量提前补偿而直接切换控制模式, 由于控制器重新调节过程, 中压直流母线出现了 62.8 V 左右的电压波动, 低压直流母线出现了 13 V 左右的电压波动; 而所提控制策略的中压直流母线电压没有出现大幅波动, 低压直流母线电压在切换过程中电压波形平稳, 从而验证了所提控制策略的有效性。

5 结论

为实现 EER 运行模式的平滑切换, 减小 EER 模式切换的暂态冲击, 本文设计了 EER 运行模式切换时序, 提出了一种基于移相比保持器、电流保持器的控制器输出量提前补偿的模式切换控制策略, 实现了 EER 运行模式的平滑切换, 并通过仿真验证了所提控制策略的正确性和有效性。结论总结如下:

1) 抑制 EER 运行模式切换时电压扰动的关键是避免系统内功率突变和控制器提前介入, 同时对控制器输出量进行补偿;

2) 针对切换过程中功率突变问题, 本文所设计的 EER 运行模式切换时序, 能够避免对直流母线造成功率冲击, 保证各端口功率的实时平衡;

3) 提出的基于移相比保持器、电流保持器的控制器输出量提前补偿策略, 能够减小母线稳压单元控制模式切换时控制器的状态差, 降减切换时控制器动态调节过程对系统产生的不利影响, 提升系统的暂态稳定性。

本文所提 EER 模式切换控制策略提高了系统的供电质量和可靠性, 为新能源接入 EER 的组网形态和运行控制策略研究提供了一定的参考价值。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 胡鹏飞, 朱乃璇, 江道灼, 等. 柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 2-12.
HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 2-12.
- [3] 赵争鸣, 冯高辉, 袁立强, 等. 电能路由器的发展及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3823-3834.
ZHAO Zhengming, FENG Gaofeng, YUAN Liqiang, et al. The development and key technologies of electric energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3823-3834.
- [4] 徐梦超, 郇能灵, 黄文焘, 等. 基于社区能源网的电能路由器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 177-183.
XU Mengchao, TAI Nengling, HUANG Wentao, et al. Energy router design based on community energy network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 177-183.
- [5] 王思尹, 粟时平, 王海明, 等. 基于切换系统理论的终端能量路由器能量路由控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 81-90.
WANG Siyin, SU Shiping, WANG Haiming, et al. An energy routing control method for a terminal energy router based on switching system theory[J]. Power System

- Protection and Control, 2022, 50(15): 81-90.
- [6] 柳梦琳, 马大中, 孙秋野. 基于信息-物理模型的多能源路由器多目标优化[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 32-41.
LIU Menglin, MA Dazhong, SUN Qiuye. Multi-objective optimization of multi-energy router based on a cyber physical model[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2021, 36(1): 32-41.
- [7] 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.
GE Jian, YANG Chen, YANG Jinggang, et al. A micro-grid architecture based on universal energy router unit and its control method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 123-130.
- [8] 吴强, 段小峰, 罗刚, 等. 能量路由器集群接入辐射型配电网选址优化[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 103-108.
WU Qiang, DUAN Xiaofeng, LUO Gang, et al. Research on location optimization of energy router cluster access to radial distribution network[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 103-108.
- [9] 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.
- [10] LIU B, PENG Y, XU J, et al. Design and implementation of multiport energy routers toward future energy internet[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 1945-1957.
- [11] 卜泽敏, 孙孝峰, 滕甲训, 等. 基于 MMC 的紧凑型能量路由器方案[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4536-4547.
BU Zemin, SUN Xiaofeng, TENG Jiaxun, et al. A compact energy router scheme based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4536-4547.
- [12] TU C, XIAO F, LAN Z, et al. Analysis and control of a novel modular-based energy router for DC microgrid cluster[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 7(1): 331-342.
- [13] LI Y, SUN Q, WANG D, et al. A virtual inertia-based power feedforward control strategy for an energy router in a direct current microgrid application[J]. Energies, 2019, 12(3).
- [14] 程静, 赵振民. 基于虚拟同步发电机的固态变压器交流端口柔性控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 138-147.
CHENG Jing, ZHAO Zhenmin. Flexible control strategy for a solid-state transformer AC port based on a virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 138-147.
- [15] LI Z, ZHENG T, WANG Y, et al. A hierarchical coordinative control strategy for solid state transformer based DC microgrids[J]. Applied Sciences, 2020, 19.
- [16] LIU B, WU W, ZHOU C, et al. An AC-DC hybrid multi-port energy router with coordinated control and energy management strategies[J]. IEEE Access, 2019, 7: 109069-109082.
- [17] LIU Y, LI Y, LIANG H, et al. Energy routing control strategy for integrated microgrids including photovoltaic, battery-energy storage and electric vehicles[J]. Energies, 2019, 12(2).
- [18] 杜云飞, 尹项根, 赖锦木, 等. 基于电能路由器的配电网稳定运行与故障恢复分层能量优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 154-164, 171.
DU Yunfei, YIN Xianggen, LAI Jinmu, et al. Hierarchical energy optimization based on electric energy router for distribution network in stable operation and fault recovery[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 154-164, 171.
- [19] 仇书山, 陈劲帆, 毛承雄, 等. 含能源路由器的交直流互联配电网协调动态优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 147-158.
QIU Shushan, CHEN Jingfan, MAO Chengxiong, et al. Coordinated dynamic optimization of AC-DC interconnected distribution network based on energy router[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 147-158.
- [20] 李凯, 赵争鸣, 袁立强, 等. 面向交直流混合配电系统的多端口电力电子变压器研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1233-1250.
LI Kai, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Overview on research of multi-port power electronic transformer oriented for AC/DC hybrid distribution grid[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1233-1250.
- [21] 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): 121-129.
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): 121-129.
- [22] 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): 32-39.
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): 32-39.
- [23] 李俊杰, 吴在军, 杨士慧, 等. 交直流混合微电网中电力电子变压器功率控制与模式切换方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8): 82-87, 110.
LI Junjie, WU Zaijun, YANG Shihui, et al. Power control and mode switching method of power electronic transformer in AC/DC hybrid microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 82-87, 110.
- [24] 陈安伟. 多母线结构交直流混合微电网协调控制与模式切换策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 175-183.
CHEN Anwei. Coordination control and mode switching strategy for hybrid AC/DC microgrid with multi-bus structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 175-183.
- [25] 季一润, 袁志昌, 孙谦浩, 等. 柔性直流配电网典型运行方式及切换方法[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 8-15.
JI Yirun, YUAN Zhichang, SUN Qianhao, et al. Typical operation mode and switching method of VSC-DC distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 8-15.
- [26] 陈锐, 宋伟伟, 涂小涛, 等. 三端星型柔性直流配电系统的启停、协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 157-164.
CHEN Rui, SONG Weiwei, TU Xiaotao, et al. Start, stop and coordinated control of three-terminal flexible DC distribution system using star-type structure[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 157-164.
- [27] 张纯江, 徐善远, 庆宏阳, 等. 主从结构微电网逆变器离网全过程平滑切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 125-133.
ZHANG Chunjiang, XU Jingyuan, QING Hongyang, et al. Seamless transferring control strategy for master-slave microgrid inverter in whole off-grid process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 125-133.
- [28] 王健建, 孙凯祺, 李可军, 等. 柔性互联配电网换流器控制模式平滑切换策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 63-72.
WANG Jianjian, SUN Kaiqi, LI Kejun, et al. Smooth switching strategy of control mode for converter in flexible interconnected distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 63-72.
- [29] 许加柱, 张伟明, 陈庆, 等. 基于控制模式切换的离网换流器无扰并网策略[J]. 电力电子技术, 2019, 53(12): 63-65, 70.
XU Jiazhu, ZHANG Weiming, CHEN Qing, et al. Offline converter uninterrupted grid-connected strategy based on control mode switching[J]. Power Electronics, 2019, 53(12): 63-65, 70.
- [30] 张国荣, 沈聪, 彭勃, 等. 馈线故障下柔性多状态开关的平滑切换策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3050-3058.
ZHANG Guorong, SHEN Cong, PENG Bo, et al. Smooth switching strategy of flexible multistate switch under feeder fault[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3050-3058.
- [31] 李霞林, 郭力, 黄迪, 等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3039-3049.
LI Xiaolin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049.
- [32] 蒲天骄, 李焯, 陈乃仕, 等. 基于电力电子变压器的交直流混合系统优化运行控制关键技术及研究框架[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2752-2759.
PU Tianjiao, LI Ye, CHEN Naishi, et al. Key technology and research framework for optimal operation control of hybrid AC/DC system based on power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2752-2759.
- [33] 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 internet based on flexible medium-voltage DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4843-4851.
- [34] 张宇涵, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 177-187.
ZHANG Yuhuan, DU Guiping, LEI Yanxiong, et al. Current status and prospects of control strategy for a DC micro grid hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 177-187.

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-08-08

作者简介:

马文忠(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为柔性直流输电与能源互联网等; E-mail: mawenzhong@126.com

邵宇阳(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能源路由。E-mail: 673262533@qq.com

(编辑 姜新丽)