

直流微电网并离网切换母线电压平滑控制技术研究

直流微电网通常通过DC/AC变流器并联到交流微电网，形成直流微电网与交流微电网并列运行模式，此时直流母线电压的稳定控制由DC/AC变流器稳定控制实现，当DC/AC出现故障退出或者发生交流电网故障时，将导致直流微电网失去电压平衡单元，在直流微电网并离网转换期间会出现供电中断以及母线电压偏差较大等问题，提出了一种直流母线电压控制方式切换过程中电压平滑稳定控制方法，该方法无须通信和集中控制器即可实现直流微电网在并离网转换过程中对直流母线电压的平滑稳定控制。实验验证得出该方法具有很好的控制效果，对今后工程实践中直流母线电压在并离网转换期间的电压稳定控制提供了很好的技术基础支撑。

毋炳鑫 陈世永 李献伟/许继集团研发中心

0 引言

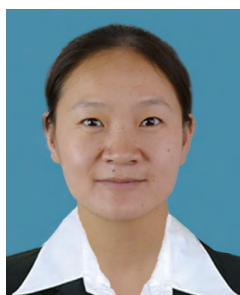
直流微电网不存在频率、相位和无功功率等复杂控制，可以方便接入直流性质的微电源和直流负荷等，由于在直流微电网中不用考虑系统无功功率的流动，使得母线电压成为反映整个系统稳定和功率平衡的唯一指标，如何进行直流母线电压的稳定控制是目前直流微电网研究的关键点之一。目前的工程设计中，直流微电网大部分通过DC/AC变流器与交流微电网相连，形成交直流混合微电网，当直流微电网与交流微电网并联运行时，由AC/DC变流器稳定控制直流母线电压，当纯直流微电网运行时，由储能DC/DC变流器稳定直流母线电压。

针对直流母线电压在直流微电网由与交流微电网并列运行转孤岛运行时，如何进行稳定直流母线电压控制，目前的研究更多关注于微电网系统内部的能量管理，而缺乏对直流微电网系统暂态过程中的稳定性研究，针对直流母线电压在暂态过程中的稳定控制，有文献提出采用后台调度实现，也有文献提出采用变流器之间通信的方式来实现，但以上控制方式都存在可靠性以及实现手段复杂、通信长延时等问题。如何在没有后台调度以及无通信线连接的情况下，实现直流微电网在并离网转换过程中母线电压的平滑切换是研究直流微电网的关键点之一。

本文提出了一种针对直流母线电压控制方式在切换期间（即直流微电网并离网转换过程中）、在没有后台通信调度以及变流器间没有通信互联的情况下，直流母线电压的平滑控制方法。由于直流侧有并联大电容的存在，直流母线电压的变化不会出现骤升或骤降，根据此特点，采用母线电压自主偏差稳定控制技术，对接入直流母线系统的DC/AC变流器以及储能DC/DC变流器进行控制策略以及参数调整设置，可自动实现直流母线电压控制方式在切换期间直流母线电压的稳定控制。

1 直流微电网并离网切换母线电压控制方法

直流微电网包含分布式发电、电力电子变流器DC/DC、储能装置和负荷。



毋炳鑫/高级工程师

关键词/Keywords

直流微电网·
直流母线电压·
自主偏差稳定控制·
并离网切换·

国家863课题：高密度分布式能源接入交直流混合微电网关键技术研究（2015AA050104）。

直流微电网通过DC/AC变流器接入到交流电网，运行于并网模式，直流母线电压由AC/DC变流器稳定控制；当DC/AC变流器出现故障退出或者发生交流电网故障时，直流微电网运行于离网运行模式，直流母线电压由DC/DC变流器稳定控制。目前，根据DC/AC变流器以及储能DC/DC变流器间的控制策略逻辑，在切换期间，直流母线电压的稳定控制有以下控制方法。

1.1 后台调度参与模式

直流微电网的并网转换是通过后台调度参与实现的，如图1所示。该策略实现过程中，后台对检测到的直流微电网电压、各个变流器输出功率以及交流电网数据进行分析，当后台检测到交流侧电压、谐波以及电流等超出并网要求时，将直流系统中储能变流器DC/DC功率输出，对光伏输出以及负荷等能量进行调平衡，再给并网变流器DC/AC发送待机或者停机指令，DC/AC变流器封闭输出脉冲，之后给储能变流器DC/DC发送控制母线电压命令信号，使储能变流器DC/DC由恒功率源模式转换为稳定直流母线电压模式。此方式由于是后台调度参与实现，存在MMS层的通信长延时以及在并网转换期间出现中断供电等情况。

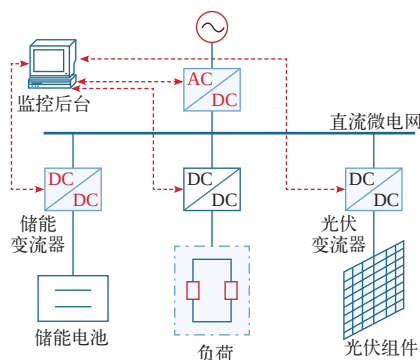


图1 后台参与的并网网转换

1.2 变流器间互联通信模式

变流器间互联通信如图2所示。此种方式下的直流微电网并网转换通过DC/AC变流器以及储能DC/DC变流器间的高速通信来实现。当直流微电网并网运行时，直流母线电压的稳定由并网变流器DC/AC来稳定控制，同时将控制信息实时通

过高速通信网络传送给储能DC/DC变流器，使得储能DC/DC变流器工作在恒功率模式。当交流微电网故障或DC/AC变流器故障退出运行时，DC/AC无法稳定直流母线电压，DC/AC发送信号通知储能DC/DC变流器从恒功率源模式转变为稳定直流母线电压模式；在离网运行模式下，直流母线电压由储能DC/DC变流器稳定控制，同时通过高速通信将母线电压的控制标志位实时传递给变流器DC/AC。

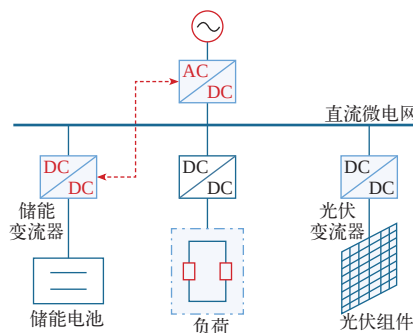


图2 变流器间互联通信

当电网故障排除或DC/AC变流器故障恢复时，变流器DC/AC将重新稳定直流母线电压，同时通知DC/DC变流器恒功率运行。此种方式由于需要变流器间的互联通信，增加了设备的软硬件投入，若出现通信故障将无法工作，可靠性不高。

2 无通信参与的母线电压平滑控制

针对上述问题，设计了当直流微电网进行并网切换时，变流器采用偏差控制技术，可自动实现直流母线电压控制方式切换过程中的电压平滑稳定。

图3a为无通信互联下直流微电网并网切换母线电压控制示意图。图3b为变流器DC/AC对直流母线电压采用定直流电压控制方式，直流母线电压稳定控制在一恒定值 U_n ，储能变流器DC/DC对母线电压的控制采用偏差控制， U_H 和 U_L 为DC/DC变换器设定的直流母线电压偏差控制的高、低偏差限值， P_{ref} 、 P_{max} 和 P_{min} 分别为有功功率指令、最大和最小有功功率运行限值。

当直流微电网并网运行时，直流母线电压的稳定控制由DC/AC变流器稳定在额定值 U_n ，此时

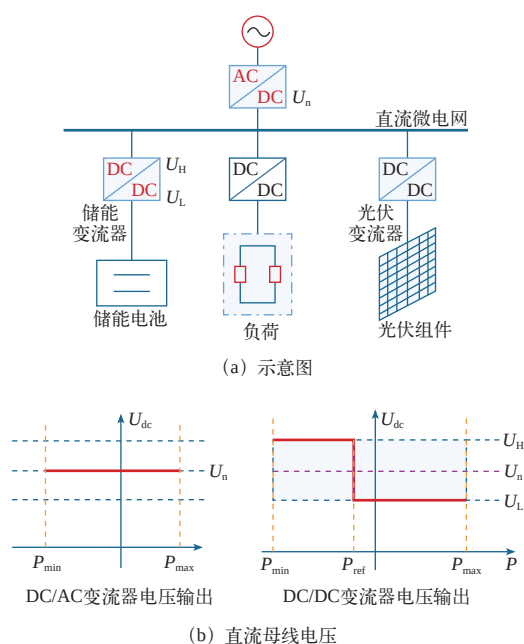


图3 无通信互联模式

DC/DC变流器工作于后台功率调度运行模式。当直流微电网处于离网运行，且分布式电源发出的电能大于负荷所需能量（即 $\Delta P_n > 0$ ）时，直流母线电压向上发生偏移。当储能DC/DC变流器检测到直流母线电压超出高电压 U_H 限值时，母线电压的稳压控制环起作用，将母线电压控制在 U_H 电压值；当检测到直流母线电压低于低电压 U_L 限值时，将母线电压控制在 U_L 电压值；当DC/DC变流器检测到直流母线电压在 $U_H \sim U_L$ 之间时，运行在功率控制模式。

直流微电网从并网转离网过程中，DC/AC变流器不再稳定直流母线电压，此时，直流母线电压会升高或者降低；当其值超出储能DC/DC变流器控制的上限值 U_H 时，储能变流器DC/DC将母线电压维持在 U_H ；同理，当直流母线电压低于储能DC/DC变流器控制的下限值 U_L 时，储能变流器DC/DC将母线电压维持在 U_L ；当在转换期间直流母线电压没有储能变流器DC/DC变流器稳定控制区间 $[U_L, U_H]$ 时，储能变流器按照原运行模式运行。

尽管公认的直流微电网系统运行要求稳定、高效，但是到目前为止，直流微电网运行标准都没有明确提到运行电压最优以及母线电压等级等问题。根据最新的直流规范DLT 5044—2014《电

力工程直流电源系统设计技术规程》，直流电源系统电压运行范围如表1所示。

表1 直流母线电压运行范围

直流母线电压 标称电压	比例		
	正常运行	最大值	最小值
直流电源系统标称电压 U_n	105% U_n	110% U_n	87.5% U_n

根据以上直流规范规定，可以相应地应用到直流微电网系统中，但是考虑到大多数直流负荷为恒功率负荷，且不同负荷的电压并不相同，因此需要在直流负荷与母线之间接入变流器，即直流负荷与直流母线之间并不是直接相连，而是通过DC/DC变流器升压后接入直流系统，在一定程度上，直流母线电压的小范围变动，不会影响直流负荷的工作情况。基于此，只需将储能变流器DC/DC的直流母线电压环的设定值设定在 $(87.5\% \sim 110\%)U_n$ ，并且各个负荷侧DC/DC变流器设定参数在储能变流器设定区间内或者稍微放宽，就可以实现直流母线电压控制方式切换时的电压平滑控制，同时不影响直流负荷的运行。

3 并离网母线电压控制策略设计

根据本文提出的直流母线电压控制方式切换过程中的电压平滑稳定方法，DC/AC变流器的直流母线电压控制策略仍沿用传统母线电压的定直流电压控制策略不变，只需修改储能DC/DC变流器的母线电压外环功率控制器控制逻辑，采用直流母线电压的自主偏差控制原理进行控制逻辑修改，就能够实现直流母线电压控制方式切换过程中的电压平滑控制，储能变流器DC/DC功率外环控制器控制逻辑如图4所示。

$$\begin{aligned} I_{dc_ref} &= \max[i_{dc_ref1}, i_{dc_ref4}] \\ I_{dc_ref4} &= \min[i_{dc_ref2}, i_{dc_ref3}] \end{aligned} \quad (1)$$

图中， U_{dc} 为实际的直流母线电压值； U_L 和 U_H 为储能DC/DC变流器母线参考电压限制； p_{ref} 为功率设定值； I_{dc_ref} 为电流参考值； I_{max} 为储能变流器最大充放电电流； I_{min} 为储能变流器最小充放电电流； I_{dc_ref1} 、 I_{dc_ref2} 和 I_{dc_ref3} 分别为各个比例积分控制器的输出值。

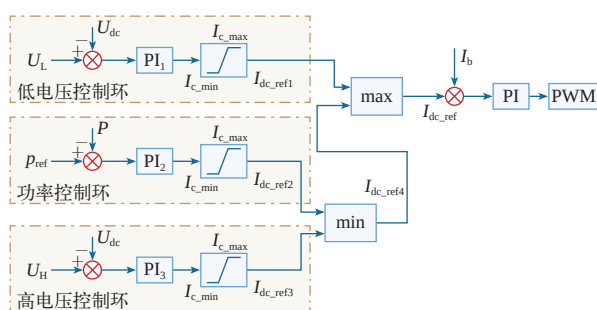


图4 储能变流器DC/DC功率控制器

根据储能DC/DC变流器控制器逻辑，当直流微电网并网运行时，母线电压由DC/AC变流器稳定在 U_n ，此时储能DC/DC变流器处于功率调度运行模式，其输出功率由 I_{dc_ref2} 决定。

(1) 直流微电网由并网转离网时

当母线电压 $U_L < U_{dc} < U_H$ 时，有

$$I_{dc_ref1} < I_{dc_ref2} < I_{dc_ref3} \quad (2)$$

由式(1)得出，储能控制器DC/DC的输出由功率环输出电流 I_{dc_ref2} 决定，此时处于功率调度运行模式。

当直流母线电压 $U_{dc} > U_H$ 时，有

$$I_{dc_ref3} < I_{dc_ref2} \text{ 且 } I_{dc_ref1} < I_{dc_ref3} \quad (3)$$

由式(1)得出，储能变流器DC/DC的输出由高电压控制环输出电流 I_{dc_ref3} 决定，将母线电压稳定在 U_H 。

当母线电压 $U_{dc} < U_L$ 时，有

$$I_{dc_ref3} > I_{dc_ref2} \text{ 且 } I_{dc_ref2} < I_{dc_ref1} \quad (4)$$

由式(1)得出，储能变流器DC/DC的输出由低电压控制环输出电流 I_{dc_ref1} 决定，将母线电压稳定在 U_L 。

(2) 直流微电网由离网转并网时

当直流微电网在离网运行时，直流母线电压由储能DC/DC变流器稳定在区间 $[U_L, U_H]$ 或稳定在高限值 U_H 、低限值 U_L ，由于DC/AC的稳定目标值为 U_n ，且其值满足 $U_L < U_n < U_H$ ，因此，当交流大电网故障恢复或DC/AC变流器恢复运行时，直流母线电压的控制目标从稳定区间 $[U_L, U_H]$ 转换到稳定目标值 U_n ，自动由DC/AC变流器来控制稳定，将直流母线电压稳定在 U_n ，DC/DC变流器工作于功率调度模式。

4 实验验证

4.1 实验系统介绍

为了验证直流微电网并网转换期间的电压平滑稳定方法，许继集团有限公司结合国家863《高密度分布式可再生能源接入交直流混合微电网关键技术研究》项目进行了实验研究，搭建了交直流微电网控制实验平台。实验系统主要参数如表2所示，图5为物理模型实验系统接线示意图。

表2 直流微电网并网切换实验系统主要参数

并网DC/AC变流器	交流侧输出	AC 400 ± 10%
	直流母线电压设定值	DC 700V
储能DC/DC变流器	直流母线电压设定高值 U_H	DC 730 V
	直流母线电压设定低值 U_L	DC 670 V

由图5可知，当直流微电网通过AC/DC变流器并联到交流微电网时，直流母线电压由AC/DC变流器稳定控制在700 V，即直流微电网并网运行；当PCC点断开后，AC/DC变流器不再稳定直流母线电压，转为稳定交流母线电压，模拟直流微电网离网运行，此时，直流母线电压由DC/DC变流器稳定控制在[670 V, 730 V]。

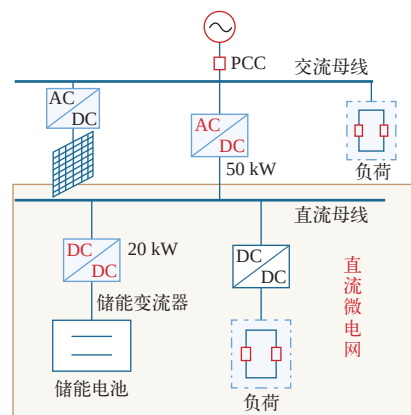


图5 实验模型简化示意图

4.2 主要实验及结果

(1) 储能变流器DC/DC空载并网转离网切换

直流微电网由并网转离网过程中，验证当储能为空载运行时，母线电压在转换过程中的平滑切换。如图6所示，储能变流器DC/DC空载，光伏出力5 kW，带9 kW负荷，并网转离网实验。图中

通道1为并网变流器AC/DC交流侧输出电压；通道2为直流母线电压；通道3为AC/DC交流输出侧电流；通道4为储能变流器DC/DC输出侧电流，以下实验波形图中通道标识相同。

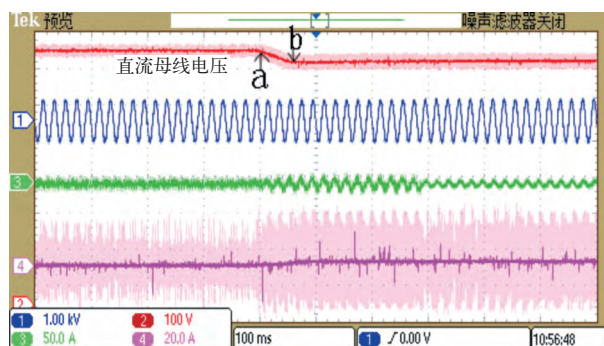


图6 储能空载并网转离网切换

a点之前直流系统运行于并网模式，母线电压由AC/DC变流器稳定在700 V；在a点进行并网转离网切换，母线电压开始下降；当下降值低于670 V时，储能DC/DC变流器夺取母线电压控制权，将母线电压控制在670 V。

(2) 储能变流器DC/DC带负荷并网转离网切换

验证当储能带负荷的情况下，直流微电网并网转离网过程中直流母线电压的平滑自动切换控制效果，储能变流器DC/DC出力10 kW，图7为实验波形。

图7中在a点之前，直流系统运行在并网模式，直流母线电压由AC/DC变流器稳定在700 V，此时储能变流器DC/DC由于直流母线电压没有超过其稳压范围，处于功率环模式，a点进行并网网转换，直流母线电压开始下降，当瞬时值下降到670 V以下时，储能变流器DC/DC起动低电压控制环，将直

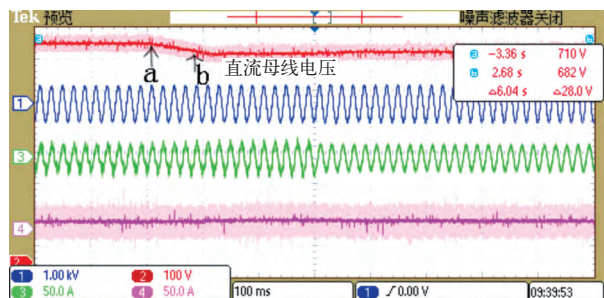


图7 储能带负荷并网转离网切换波形

流母线电压稳定在670 V。

(3) 储能变流器DC/DC空载离网转并网

直流微电网由离网转并网过程中，验证当储能为空载运行时，母线电压在转换过程中的平滑切换。如图8所示，初始储能DC/DC空载，光伏出力10 kW，AC/DC带10 kW负荷。

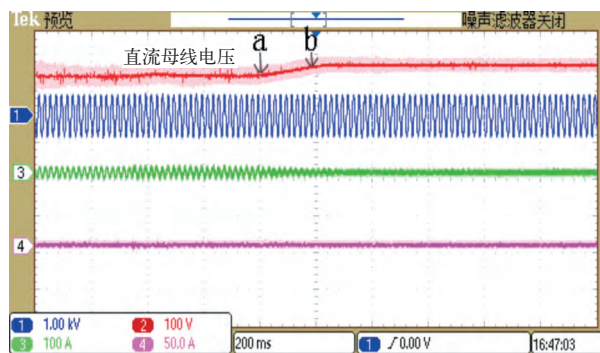


图8 储能空载离网转并网切换波形

图8中，在a点之前，直流微电网运行在离网模式，直流母线电压由储能DC/DC稳定在区间[670 V，730 V]，在a点进行离网转并网切换，直流母线电压逐步由AC/DC进行稳定，在b点稳定保持在700 V。

(4) 储能变流器DC/DC带负荷离网转并网

验证在储能带负荷的情况下，进行直流微电网离网转并网过程中，直流母线电压的平滑自动切换控制效果，初始储能DC/DC变流器出力4 kW，光伏出力5 kW，带9 kW负荷。图9为实验波形。通道4为光伏逆变器电流，其他通道含义不变。

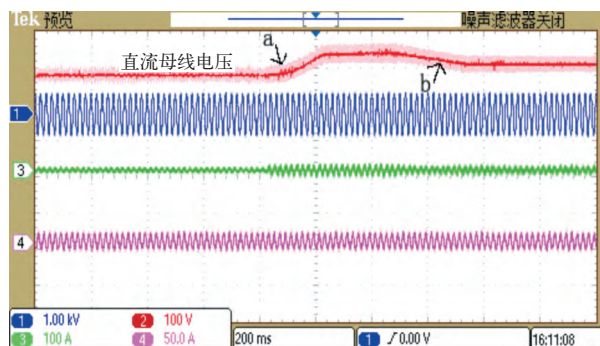


图9 带负荷离网转并网切换波形

图9中，在a点之前，系统运行在离网模式，直流母线电压由储能DC/DC稳定在670 V；在a点进行离网转并网切换，母线电压上升，DC/DC电压

环饱和进入功率环运行；在b点，DC/AC成功将母线电压稳定保持在700 V。

(5) 储能变流器DC/DC对直流母线电压的自主稳定

通过自主偏差原理验证储能变流器对直流母线电压的稳定控制。当电压高于730 V时，保持稳定在730 V；当电压低于670 V时，保持稳定在670 V，当电压在区间[670 V, 730 V]时，保持功率调度运行。储能变流器DC/DC对母线电压的偏差稳定如图10所示。

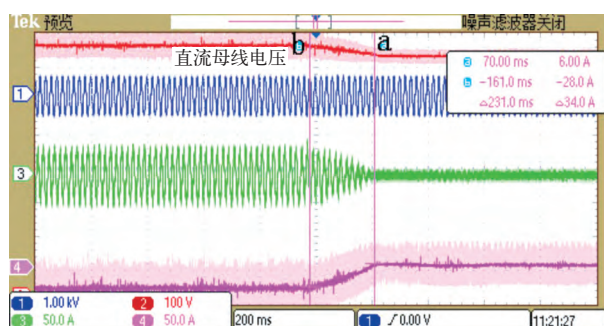


图10 储能变流器DC/DC对母线电压的偏差稳定

图10中，在b点之前，储能变流器DC/DC以满功率对蓄电池进行充电，当母线电压高于730 V时，将直流母线电压稳定在730 V；b点开始进行功率调度，直流母线电压下降。当电压降低到670 V以下时，储能变流器将直流母线电压稳定在670 V。

5 结束语

本文提出了一种直流母线电压控制方式切换过程中的电压平滑稳定控制方法，该方法不需要变流器之间进行通信，也不需要后台参与调度，通过对变流器的参数以及策略的修改，可很好地实现直流微电网并网及离网转换过程中的直流母线电压自主平滑切换控制。该方法容易实现简单可靠，可用于直流微电网并网离网转换过程，也可用于交直流混合微电网中母线电压的稳定控制。实验验证得出该方法具有较好的控制效果，对今后工程实践并网切换中直流母线电压稳定控制提供了有力的技术基础支撑。

参考文献

- [1] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (2): 248-254.
- [2] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (9): 1-8.
- [3] Slobodan Cuk, Single-Stage, AC-DC Converter Topologies of 98% Efficient Single Phase and Three-Phase Rectifiers [C]. Proceedings of the 10th PCIM Asia Conference, 2013 (6).
- [4] 李兆伟, 任先成, 刘福锁, 等. 交直流并联电网中直流功率紧急控制影响及优化研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (20): 104-109.
- [5] Zhu Huangqiu, Zhang Weiyu, Wang Quan, et al. Decoupling control of AC-DC-3DOF-HMB based on inverse system method [C]. Proceedings of 2010 Chinese Control and Decision Conference, 2012 (5).
- [6] 王世谦, 田春箐. 多电压等级交直流电网协调发展新思路 [J]. 中国电力报, 2015.
- [7] Liu C, Cjau K T, Diao C, et al. A new DC micro-grid system using renewable energy and electric vehicles for smart energy delivery [C]. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2010). Lille: IEEE, 2010: 1-6.
- [8] 唐磊, 曾成碧, 苗虹, 等. 交直流混合微电网中AC/DC双向功率变流器的新控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (14): 13-18.
- [9] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微电网研究中的关键技术 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (1): 98-113.
- [10] 周玮, 姜汀, 胡姝博, 等. 基于两点估计法的交直流混合系统电压稳定概率评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (5): 8-13.
- [11] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电稳定性分析和控制综述 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (10): 288-300.

(收稿日期: 2016-10-20) EA