[储能变流器]

储能变流器并网状态下转离网运行控制研究

文/董极慧[1] 鲍鹏飞[1] 王新泽[1] 卢宝宏[2,3] 管爱伟[2,3]
1. 内蒙古察哈尔新能源有限公司；2. 新源智储能源发展（北京）有限公司；
3. 电化学能源消防安全联合创新应急管理部重点实验室

深入分析储能变流器并离网运行控制策略，通过优化离网运行控制策略给出采用传统交流断路器实现储能变流器并网转离网无缝切换的控制方法。首先，建立新型三电平储能变流器的系统拓扑图，从系统采样到运行控制给出了储能变流器并离网运行实现方案。其次，利用MATLAB／Simulink建立储能变流器并离网模型，对并网转离网控制策略进行了仿真验证。最后，利用500 kW的储能变流器试验台，运行结果验证了该控制策略的有效性。

随着全球能源需求不断增长以及对环境保护意识的不断提高，可再生能源的应用逐渐成为解决能源和环境问题的有效途径。然而，可再生能源的特点是不稳定和间歇性的，如太阳能和风能。为了实现可再生能源的大规模应用，储能技术成为不可或缺的一部分。在储能技术中，储能变流器（PCS）作为能源转换和储存的关键环节，为可再生能源的大规模应用提供技术支持和保障。在并网模式下，通过削峰填谷、一次调频等不仅可以平衡能源供需，提高电网的稳定性，还可以减少传统能源的热备用容量。而储能变流器的并网转离网的无缝切换技术不仅可保障应急设备的供电需求，还可以带动其他发电设备启动，完成供电系统黑启动功能。

近年来，国内外众多学者对并网转离网无缝切换这一问题进行了大量研究。文献[1]提出一种采用快速切换开关STS实现并离网转换的方案，该方案需要增加专用的并网柜，不仅需要增加成本投入，而且需要对STS单独控制，增加控制的复杂度。文献[2]提出一种微电网并网转离网预同步的方案，该方案保证离网时电压相位的平滑性，但就并网转离网切换过程时可能引发的瞬时过电流问题未提出对应的控制策略，无法保障每次并网转离网的稳定性。

本文综合以上研究成果，在深入研究并网转离网的控制策略基础上，首先，通过幅值锁定和相位跟踪，给出并网转离网过程中电压幅值与相位的平滑过渡实现方案，避免因孤岛检测时，电压波动导致离网后跟随的电压幅值发生变化；其次，通过在电流环的给定中，增加电流限幅调节器（CR），抑制并离网过渡态可能发生的过电流故障，达到无需快速切换开关STS就能实现无缝切换的新方法。该方法无需增加系统硬件成本，具有良好的市场应用前景。

储能变流器系统及控制

本文所研究的储能变流器系统控制框图如图1所示，电气拓扑为NPC三电平，控制系统采用DSP28377D+FPGA。电网、逆变电压及电流等模拟量经过信号调理电路转换为0～3 V的信号送入DSP完成储能变流器控制周期PWM更新后，再将此PWM驱动信号送入FPGA。经过逻辑和时序的检查后，驱动对应的IGBT实现储能变流器系统控制。所有系统的硬件故障信号直接送入FPGA实现驱动信号PWM的即时封波，提升系统的运行可靠性。

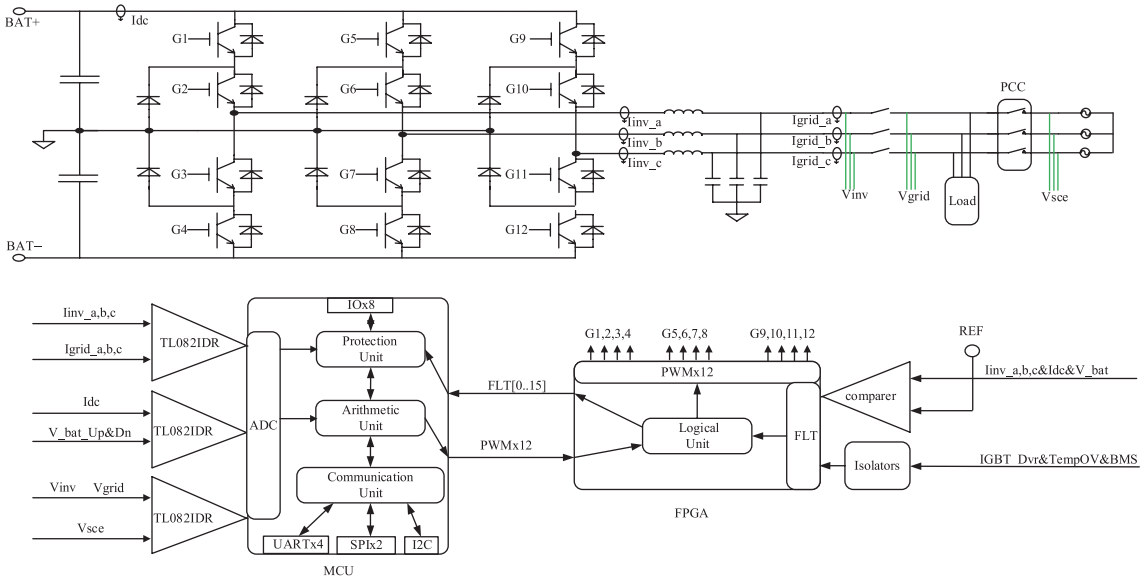

图1　储能变流器系统控制框图

储能变流器运行模式

储能变流器具备并网和离网两种工作模式。在并网模式下，储能变流器实现储能电池与电网之间的双向能量转换；在离网模式中，储能变流器可以给本地部分负荷提供满足电网电能质量要求的交流电能，下面分别讨论两种运行模式。

1. 并网运行模式

并网模式下变流器本质上为电流源模型，接受EMS的功率/电流调度，控制环路上由功率外环和电流内环组成。功率外环用于跟随功率给定，电流内环用于快速响应功率外环的误差值，对电流进行有效跟踪，从而实现对给定功率参考值的无静差控制。

在同步旋转坐标系下，逆变器输出的瞬时功率分别表示为

$$P=\frac{3}{2}\left(u_d i_d+u_q i_q\right) \tag{1}$$

$$Q=\frac{3}{2}\left(u_q i_d+u_d i_q\right) \tag{2}$$

式中，u_d、u_q为分别为u_a、u_b、u_c在dq坐标轴上的等效分量；i_d、i_q为分别为电感电流$i_{\text{inv_a}}$、$i_{\text{inv_b}}$、$i_{\text{inv_c}}$在dq坐标轴上的等效分量。

并网模式下，电压外环、电流内环的控制方程为

$$i_d^*=\left(K_{pd11}+\frac{K_{id11}}{s}\right)\left(P_{\text{ret}}-P\right) \tag{3}$$

$$i_q^*=\left(K_{pq12}+\frac{K_{iq12}}{s}\right)\left(Q_{\text{ret}}-Q\right) \tag{4}$$

$$u_d=\left(K_{p21}+\frac{K_{i21}}{s}\right)\left(i_d^*-i_d\right)-\omega L i_q+e_d \tag{5}$$

$$u_q=\left(K_{p22}+\frac{K_{i22}}{s}\right)\left(i_q^*-i_q\right)-\omega L i_d+e_q \tag{6}$$

系统控制框图如图2所示。

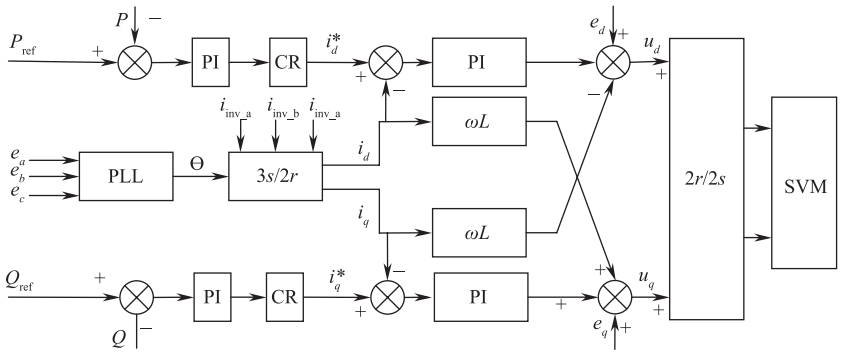

图2　储能变流器并网控制

首先，采样网侧电压的瞬时值e_a、e_b、e_c，通过锁相环PLL得到电压相位θ，通过abc/dq变换得到dq旋转坐标系下网侧电压瞬实值e_d、e_q。同理采样电感电流的瞬时值i_{inv_a}、i_{inv_b}、i_{inv_c}，经过abc/dq转换得到三相电感电流瞬时值i_d、i_q。功率外环经过PI调节器后得到的参考值i_d^*、i_q^*与实际值进行比较，得到的误差值经过PI调节器后输出的值与前馈量和解耦项相加减得到输出电压值u_d、u_q，再通过$dq/\alpha\beta$坐标变换得到$\alpha\beta$坐标系下的电压分量，后生成SVPWM调制波。经过与载波比较生成驱动信号驱动IGBT动作，从而实现并网恒功率控制。

2. 离网运行模式

离网模式下变流器本质上为电压源模型，实现恒压恒频控制，由电压外环和电流内环组成，*V-F*控制策略与*P-Q*控制策略的不同之处在于电流参考值的获取方式不同。离网模式下，电压外环、电流内环的控制方程为

$$i_d^* = \left(K_{pd11} + \frac{K_{id11}}{s}\right)\left(U_d^* - U_d\right) \tag{7}$$

$$i_q^* = \left(K_{pq12} + \frac{K_{iq12}}{s}\right)\left(U_q^* - U_q\right) \tag{8}$$

$$u_d = \left(K_{p21} + \frac{K_{i21}}{s}\right)\left(i_d^* - i_d\right) - \omega L i_q + e_d \tag{9}$$

$$u_q = \left(K_{p22} + \frac{K_{i22}}{s}\right)\left(i_q^* - i_q\right) - \omega L i_d + e_q \tag{10}$$

系统控制框图如图3所示。

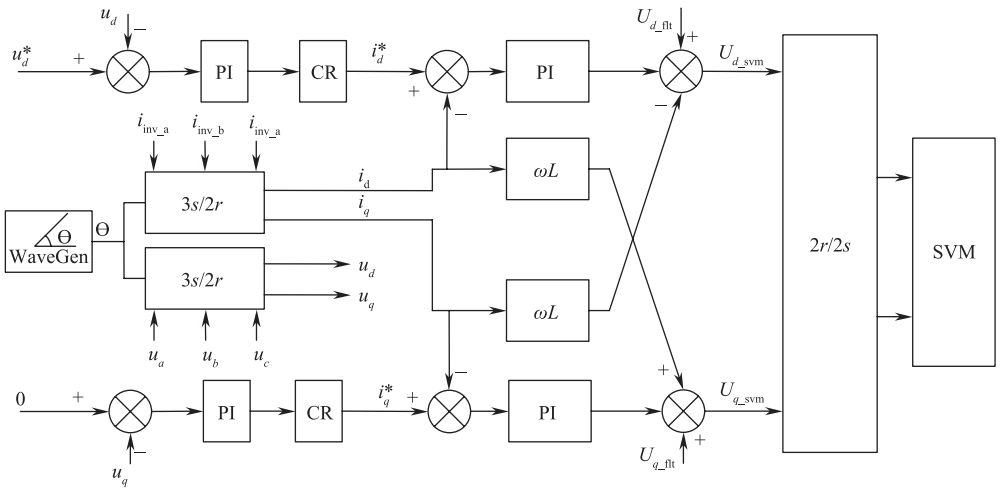

图3　储能变流器离网控制

由图3可知，电压外环的控制目标为负载侧电压，通过电压采样得到abc坐标系下三相电压瞬时值u_a、u_b、u_c，再通过abc/dq变换得到dq旋转坐标系下三相电压瞬实值u_d、u_q。将参考值u_d^*、u_q^*与实际值进行比较，得到的误差值经过PI调节器运算后输出的值i_d^*、i_q^*作为电流内环的参考值给定。通过电流采样得到abc坐标系下三相电感电流瞬时值i_{inv_a}、i_{inv_b}、i_{inv_c}，再通过abc/dq变换得到dq旋转坐标系下三相电流瞬时值i_d、i_q。将参考值i_d^*、i_q^*与实际值作差，得到的误差值经过PI调节器运算后输出的值与电压前馈量和负载项相加减得到输出电压值u_d、u_q，再通过$dq/\alpha\beta$坐标变换得到$\alpha\beta$坐标系下的电压分量，后生成SVPWM调制波，经过与载波比较生成驱动信号驱动IGBT动作，实现离网运行的控制。

并网转离网切换关键技术

1. 孤岛检测技术

目前，储能系统的孤岛检测技术大多采用无功电流扰动-频率正反馈法。当系统输出的无功增加时，使得PCC电压的频率也随之增大，进而通过正反馈作用使得无功电流增大，直到频率超出孤岛保护的范围。系统的无功功率在PCC电压不变时，是由q轴输出的无功电流来决定的，因此PCC的频率与无功电流存在同样的关系。无功电流扰动选取PCC电压频率与电网额定频率之差，同时为了使较小的无功扰动获得较大的频率变化以提高检测速度，在扰动量中引入频率的正反馈，加入反馈系数，其表达式为

$$i_{fq} = k(f_s - f_n) \tag{11}$$

式中，k为频率反馈系数；f_s为锁相环的输出频率；f_n为电网系统的额定频率；i_{fq}为孤岛检测扰动无功电流。

储能变流器并网模式下，在电流环的给定处叠加无功扰动电流i_{fq}，如果此时电网失电，无功电流的注入一定会引起PCC处电压或者频率异常。系统根据设定的检测门限，判定孤岛状态后立刻启动并网转离网切换，频率反馈系数k可调节扰动的敏感度，控制系统框图如图4所示。

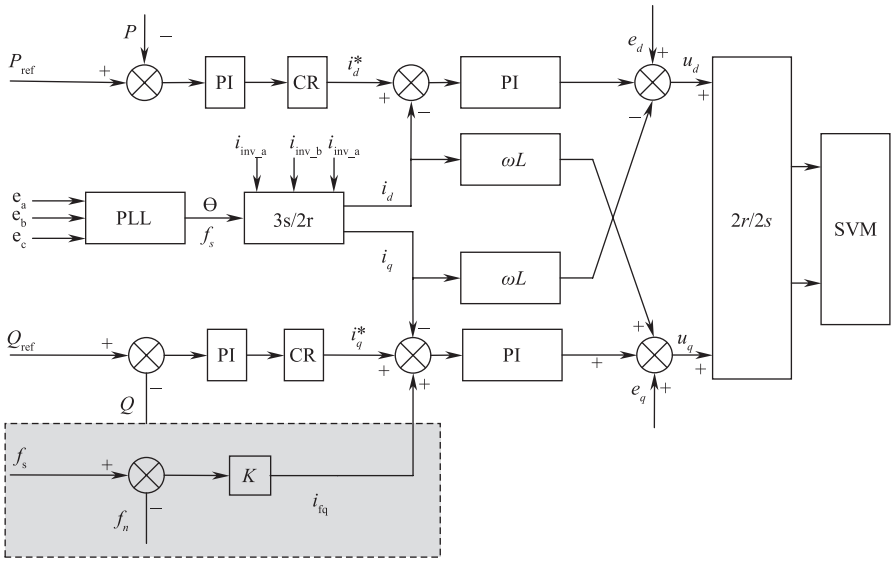

图4　三相无功电流扰动+频率正反馈控制结构图

2. 并网转离网切换

并网转离网切换分为两种情况：主动离网和被动离网。本文针对被动离网切换进行分析。并网运行时，系统网侧电压和频率被电网钳位，储能逆变器工作于P-Q控制策略。当电网发生故障时，系统输出无功电流产生波动，此时系统根据基于三相无功电流扰动+频率正反馈控制策略的孤岛检测技术判定为发生被动离网状况。系统输出锁定电压幅值，切换内置跟随电网的初相位给定，通过电压外环、电流内环控制完成离网V-F控制策略下的系统稳定运行。并网转离网切换流程图如图5所示。

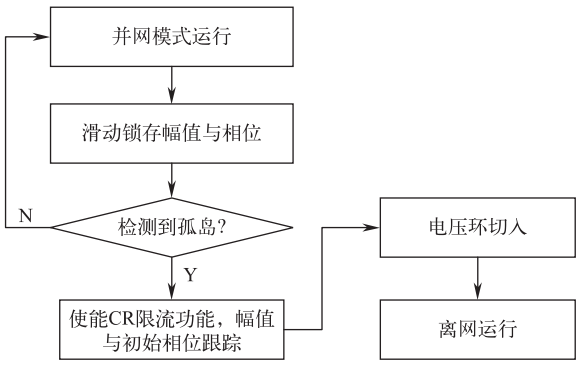

图5　并网转离网流程图

3. 过渡态电流控制

由于断路器分断时间一般接近100 ms，采用传统的控制策略，很难实现并网转离网的无缝切换。如果PCC处的断路器实际未断开的情况下，并网切换为离网后，由于储能变流器在离网状态下本质是电压源特性，因此两个电压源并联一定会引发变流器过电流；而如果等到PCC处的断路器完全脱开后再转换为离网运行，则无法实现无缝切换。鉴于此，文献中[3-4]并离网无缝切换方案均采用快速切换开关以缩短并离网切换时间在20 ms以内。

本文在深入并网环路控制策略后，在电流环的电流指令给定增加电流限幅调节器（CR）。检测到孤岛时，在发出断开断路器指令的同时，使能CR调节器，对电流输出进行限幅，保证在并网转离网的切换暂态过程电流输出稳定，实现传统断路器的无缝并离网切换。

仿真验证

为了验证本文所提出的并离网控制策略的有效性，利用MATLAB/Simulink搭建了500 kW的储能变流器系统进行仿真分析。系统模型包括交流电源

模型，三电平逆变器以及电池模拟器，其拓扑结构图如图6所示。验证负载采用额定容量500 kV·A的60%阻感负载和100%的阻感负载，功率因数均为0.8，仿真波形如图7和图8所示。

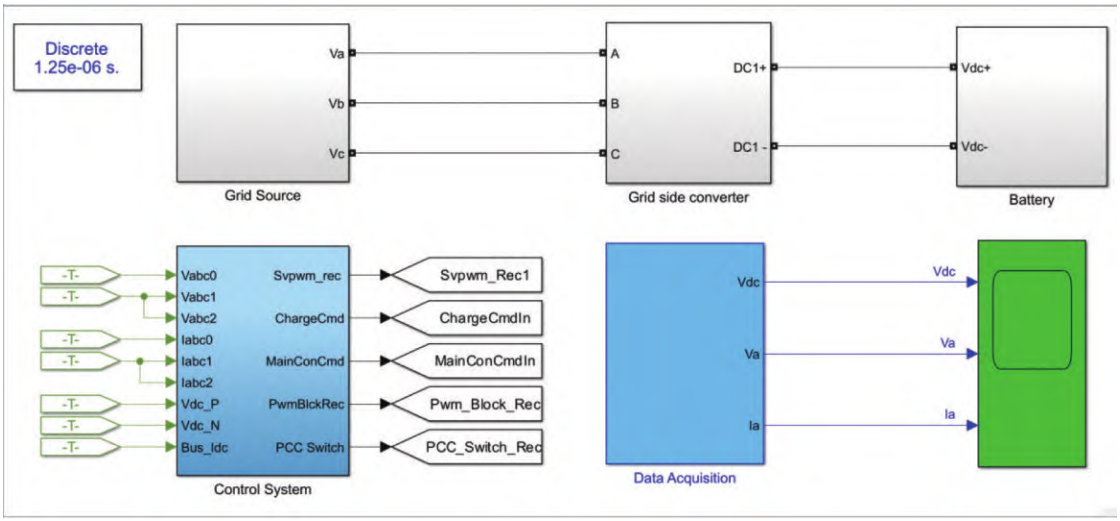

图6　并网转离网流程图

图7为阻感负载300 kV·A，功率因数0.8，并网转离网储能变流器仿真图。从图7上可以看到并网时，储能变流器向电网放电500 kW，此时电网侧的电流除去负载有功损耗，还包括电网给负载提供的无功电流。0.28 s时，电网掉电，电网侧三相电流瞬间为0，储能变流器的功率由并网的500 kW转化为离网带载300 kV·A，储能变流器自身输出电流减小，负载电流基本保持稳定，完成并网转离网无缝切换。

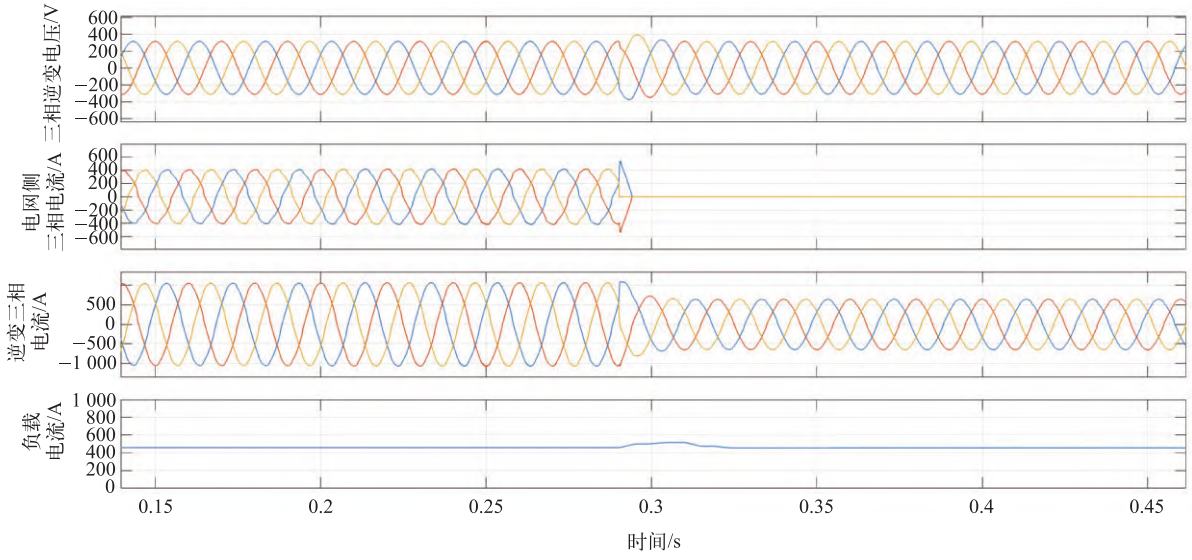

图7　阻感负载60%Pn，功率因数0.8，并网转离网，储能变流器仿真图

图8为阻感负载500 kV·A，功率因数0.8，并网转离网储能变流器仿真图。从图8上可以看到并网时，储能变流器仍然向电网放电500 kW。0.28 s时，电网掉电，电网侧三相电流瞬间为0，储能变流器的功率由并网的500 kW转化为离网带载500 kV·A，储能变流器自身输出电流大小不变，负载电流基本保持稳定，完成并网转离网无缝切换。

综上所述，根据图7和图8的仿真结果分析，本文提出的在并离网切换的暂态过程中通过增加电流环参考电流给定限幅后，储能变流器在并离网切换的过渡过程中能够很好地抑制电流变化，实现并离网的无缝切换。

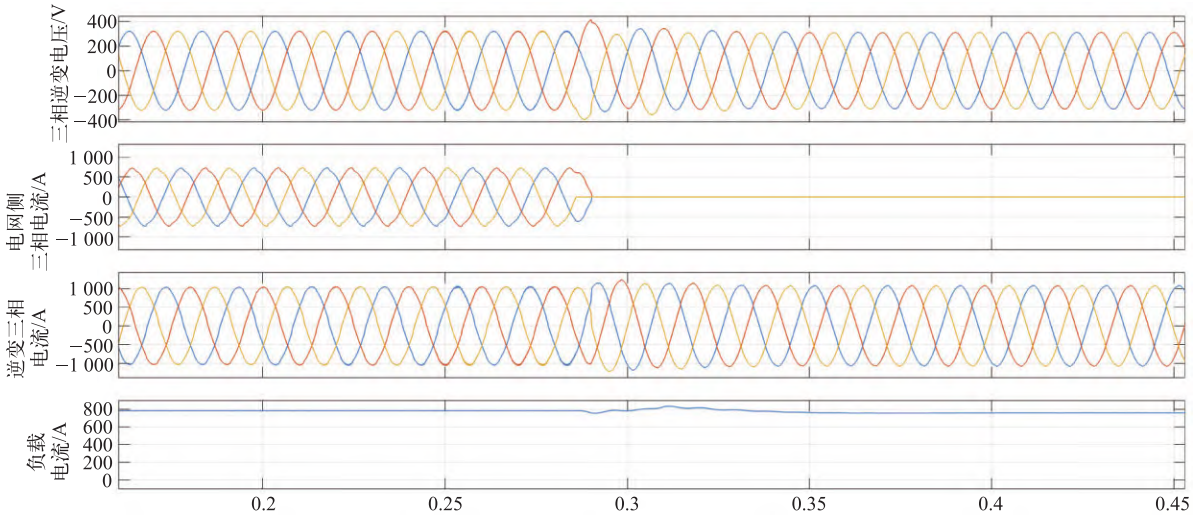

图8　阻感负载100%P_n，功率因数0.8，并网转离网，储能变流器仿真图

实验验证

为进一步验证本文提出的并离网切换方案的可行性，在实验室搭建了500 kW的PCS试验台，系统的拓扑如图1所示。储能变流器的参数见表1。

表1　储能变流器参数

储能变流器	数值	储能变流器	数值
母线支撑电容/μF	3 600	逆变侧电感/mH	0.15
直流侧电压/V	750	交流滤波电容/μF	3×55.8
直流滤波电感/μH	50	交流线电压/V	400
IGBT开关频率/kHz	12	交流输出频率/Hz	50

实验台并离网所用的PCS均采用两台250 kV·A的PCS进行并联组成500 kV·A的功率。其中两台并联设备设置为离网运行模式，模拟电网电源，通过1 200 A的断路器引出，断路器模拟PCC并网点的开关；另外两台并联设备作为并网模式运行，如图9所示。通过关闭离网储能变流器模拟电网故障，测试并网储能变流器能否实现带载无缝切换。

为了与仿真对比，阻感负载仍然分别选取60%P_n（300 kV·A）及100%P_n（500 kV·A），功率因数均为0.8。储能变流器并网后，向电网放电500 kV·A。从实验结果来看，无论在60%P_n还是100%P_n，并离网转换均能无缝切换，负载上的电流基本保持不变，实际测试结果与仿真基本吻合。

结束语

当电网发生故障或在孤岛应用场景时，储能变流器需要快速由并网模式切换至离网运行，尤其针对关键用电设备，如数据存储设备等，无缝切换技术起到关键作用，可保证并离网运行模式切换平滑、快速。传统的并离网无缝切换技术需要储能系统接入静态开关，实现快速分合闸。本文通过深入研究并离网控制策略，提出一种改进型的并离网切换过渡态电流控制方法。该方法通过限制过渡态的电流可弥补断路器分合闸带来的延时，实现并离网的无缝切换。仿真和试验结果表明，改方法可以有效实现储能变流器并离网无缝切换，验证控制方法的正确性和有效性。EA

（收稿日期：2024-11-11）

参考文献

[1] 奚俊．新能源高渗透率下区域电网并离网切换控制技术[D]．南京：南京邮电大学，2023．

[2] 高波．含储能系统的微电网并—离网切换控制与调度策略研究[D]．马鞍山：安徽工业大学，2021．

[3] 王新宇，王生铁，刘瑞明，等．交直流混合微电网并离网平滑切换控制策略研究[J]．呼和浩特：内蒙古工业大学学报(自然科学版)，2022，41(6)：531-540．

[4] 金祝锋．三相有源箝位三电平逆变器设计及并离网模式平滑切换策略研究[D]．杭州：浙江大学，2019．