

适应多类型电网故障的储能系统预测电流控制与 LVRT 策略

刘其辉¹, 葛立坤¹, 郭晓芸²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国家电网客户服务中心南方分中心, 江苏 南京 211100)

摘要: 为了实现储能装置的功率转换系统 (Power Conversion System, PCS) 在电网发生对称和不对称故障时的低电压穿越 LVRT (Low Voltage Ride Through, LVRT) 控制, 考虑到目前 PCS 控制方面的不足之处, 通过分析预测电流控制原理, 推导 α - β 坐标系中 PCS 瞬时功率方程, 设计了一种电网故障情况下 PCS 的 LVRT 控制策略。建立基于 PSCAD 的 84 kW 储能电池 PCS 系统, 针对电网多类型故障进行仿真; 在已有控制策略经过仿真验证之后, 又将该策略移植到硬件设施中进行实验。仿真结果表明, 该控制策略可以有效实现储能系统的低电压穿越功能。

关键词: 储能系统; 电网故障; 功率转换系统; 预测电流控制; 低电压穿越

A low voltage ride through technology adapting to multi-grid fault of battery energy storage system

LIU Qi-hui¹, GE Li-kun¹, GUO Xiao-yun²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. The Southern Sub-center of State Grid Customer Service Center, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to realize low voltage ride through (LVRT) by controlling the power conversion system (PCS) of the energy storage device in the situation of both the balance and unbalance grid voltage fault, considering the shortage of power conversion system (PCS), and by analyzing the predictive current control principle, this paper derives PCS instantaneous power equation in α - β coordinate system and designs a strategy to realize LVRT fault control. Then it builds a single battery module (84 kW) control system based on the PSCAD to simulate multiple types of grid fault. After the existing control strategy is simulated and verified by the software simulation, the strategy is transplanted to the hardware facilities in the experiment. The results show that this control strategy can effectively achieve the LVRT function in the energy storage system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50807012).

Key words: energy storage system (ESS); grid fault; power conversion system (PCS); forecast current-controlled; low voltage ride through (LVRT)

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)10-0096-08

0 引言

随着新能源接入电网所占比例的不不断提高, 电网的动态稳定性问题日益突出, 增设储能系统 (Energy Storage System, ESS) 逐渐成为电力系统提高稳定性的新手段, 它能够平滑新能源发电的输出功率并提高它的调峰能力。ESS 中的功率转换系统-PCS (Power Conversion System, PCS) 是连接储能电池和电网间的桥梁, 是实现 ESS 与电网能量交换的核心。电网故障时, PCS 若不能采取相应措施来

进行自我保护, 则可能烧坏变流器。因此对 PCS 低电压穿越 (Low Voltage Ride-Through, LVRT) 研究的重要性也日益突出^[1-3]。

目前多种 PCS 控制策略得到成功应用, 这些方法均假定电网三相电压完全对称^[4-5], 但实际上 ESS 一般通过长距离输电线路与系统相连, 易受各种电网状况的影响。不对称故障或不平衡负载所导致的三相电网电压不对称是实际电网中的常见现象^[6]。文献[7]针对风力发电系统中的变流器提出了电网正负序电压分别定向的矢量控制策略, 该方法可以消除功率波动, 稳定直流母线电压, 然而电网发生不对称故障时, 变流器不具有紧急无功控制能力。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50807012)

文献[8]根据储能电池的非线性特性, 设计了双向 DC-DC 变流器与 DC-AC 并网变流器结合的能量转换系统, 基于反馈线性化理论, 设计了 PCS 的非线性内环控制器。但该方法采用了 6 个 PI 控制器, 增加了计算复杂度, 且不适用于电网故障情况。文献[9]中储能变流器采用同步旋转 d-q 坐标下的间接电流控制, 通过变流器直流输出计算出网侧有功分量和无功给定值, 这种控制方法在电压型逆变器中有一定的借鉴意义, 但是采用同步旋转 d-q 坐标系, 需要进行多次坐标转换, 算法复杂电网故障时锁相系统可能不准确而使 PCS 失去控制, 烧坏变流器。文献[10]中指出了光伏 PCS 实现 LVRT 的三种方法, 增设无功补偿设备实现 LVRT 适用于储能 PCS, 但该方法进行硬件改造, 增加了 ESS 的安装成本。

针对储能 PCS 软件控制方法实现 LVRT 这一缺失, 本文分析了电网故障对 ESS 的影响, 建立了 PCS 正、负序复合型数学模型, 通过分析预测电流控制原理建立了 α - β 坐标系中 PCS 瞬时功率方程, 结合储能环节的特殊结构, 以抑制 LVRT 时的过电流和不对称故障时产生的有功功率二倍频分量为目标, 采用不需要锁相环和旋转坐标变换的电网不对称条件下 PCS 预测电流控制策略, 采用 PSCAD/EMTDC 仿真证明了该策略的正确性与可行性。

1 储能系统结构及原理

目前储能技术主要分为物理储能、化学储能和电磁储能三大类。物理储能主要包括扬水蓄水储能和压缩空气储能等, 化学储能主要包括各类蓄电池, 电磁储能包括超导线圈与超级电容器^[11]。图 1 为本文的研究对象—84 kW 的电池储能系统, 该系统通过 PCS 连接到 380 V 的电网上, 主要包括电网、变压器、交流侧滤波器、PCS、直流侧支撑电容和模拟蓄电池六大部分。PCS 工作于储能电池和电网之间, 其功能是将电网电能存入储能电池中或将储能电池中的能量回馈到电网, 实现储能电池和电网之间能量的有序交换, 它不仅要在电网正常时提高电力系统电能质量, 还要在电网故障时为关键负荷供电^[12]。特别指出本文采用单级式变流器实现并网控制, 不仅实现了功率的双向流动, 负载可以向电源回馈能量; 而且整个系统只需一级功率变换即可完成两级结构的全部功能, 降低了变换器的通态损耗和系统的复杂性, 提高了系统的效率和可靠性。克服了双级式变流器器件数多, 系统可靠性相对较低, 体积重量较大, 系统较复杂, 成本较高的一些缺点^[13]。

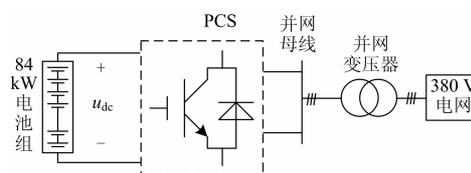


图 1 储能系统结构

Fig. 1 Energy storage system structure

在电网正常工作情况下, 通过不同的控制方式, 可以实现储能电池的恒功率充、放电, 恒压放电等模式。当电网三相电压对称跌落时, 输送到电网的功率突然减小, 若不及时调节储能电池输入功率, 则功率不平衡将导致变流器输出电流迅速上升, 危及变流器安全^[14-16]。储能电池不同于直驱风机和光伏之处在于储能电池直流侧由于大电容钳位的原因, 在电网侧电压跌落的情况下直流母线电压不会出现过大的波动。当电网出现不对称的电压跌落时, 如果不采取措施实现负序电流的控制, PCS 很容易发生过流而损坏。此外, 输出有功功率会发生 2 倍电网频率的正弦波动, 进而使直流侧电压产生 2 倍频波动, 危及变流器整体稳定性^[17]。综上, ESS 应具备一定的耐受电网故障(对称、不对称)的能力, 避免在故障时脱网, 引起其他连锁故障。目前, 还没有明确提出 ESS 低电压穿越要求, ESS 和光伏 PCS 的功能和控制方法相似, 一般参考光伏电站的电压响应特性曲线^[18]。

2 储能 PCS 的正、负序复合模型

储能 PCS 拓扑结构如图 2 所示, 图中 e_a 、 e_b 、 e_c 为三相电网电压, v_a 、 v_b 、 v_c (i_a 、 i_b 、 i_c) 为储能 PCS 的三相输入电压(电流), L_s 和 R_s 为等效的进线电感和电阻, C_{dc} 为直流侧支撑电容, u_{dc} 为直流侧母线电压, i_{load} 为直流侧负载电流。

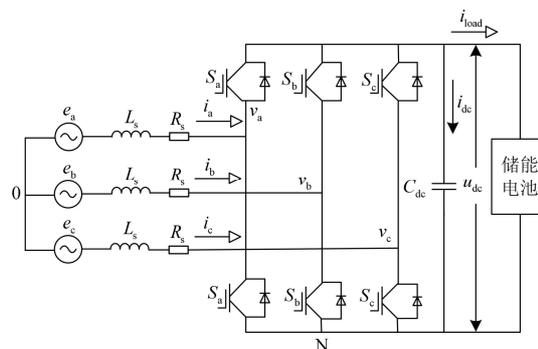


图 2 PCS 拓扑

Fig. 2 PCS topology

根据图 2 所示拓扑, 由基尔霍夫电压、电流定律得三相静止 abc 坐标系下 PCS 变流器的数学模型为

$$\begin{cases} e_a = L_s \frac{di_a}{dt} + R_s i_a + \left(S_a - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) u_{dc} \\ e_b = L_s \frac{di_b}{dt} + R_s i_b + \left(S_b - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) u_{dc} \\ e_c = L_s \frac{di_c}{dt} + R_s i_c + \left(S_c - \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \right) u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{load} \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_a 、 S_b 、 S_c 分别为三相桥臂开关函数: $S_k=1$ ($k=a,b,c$) 表示相应桥臂上管导通, 下管关断; $S_k=0$ 表示相应桥臂上管关断, 下管导通。

三相电源相互耦合, 而且电网电压电流均为时变交流量, 不利于控制系统的实现。通过坐标转换将三相静止 abc 坐标系下的数学模型转换到两相静止 α - β 坐标系中, 对式 (1) 进行 3s/2s 坐标变换可以得到两相静止 α - β 坐标系下 PCS 变流器的数学模型为

$$\mathbf{E}_{\alpha\beta} = \mathbf{V}_{\alpha\beta} + L_s \frac{d\mathbf{i}_{\alpha\beta}}{dt} + R_s \mathbf{I}_{\alpha\beta} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{E}_{\alpha\beta}$ 是电网侧电压复矢量; $\mathbf{V}_{\alpha\beta}(\mathbf{I}_{\alpha\beta})$ 是 α - β 坐标系中变流器交流侧电压(电流)复矢量。

当电网不平衡时, $\mathbf{V}_{\alpha\beta}$ 、 $\mathbf{I}_{\alpha\beta}$ 均含有正序、负序分量, 根据已有文献在系统发生不对称故障时采用 T/4 正负序分离法提取出系统中的负序量进行控制^[19], 则

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{\alpha\beta} = \mathbf{V}_{\alpha\beta}^p + j\mathbf{V}_{\alpha\beta}^n \\ \mathbf{I}_{\alpha\beta} = \mathbf{I}_{\alpha\beta}^p + j\mathbf{I}_{\alpha\beta}^n \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{V}_{\alpha\beta}^p$ 、 $\mathbf{V}_{\alpha\beta}^n$ ($\mathbf{I}_{\alpha\beta}^p$ 、 $\mathbf{I}_{\alpha\beta}^n$) 分别为 α - β 坐标系下的变流器交流侧电压(电流)的正、负序矢量。且有

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{\alpha\beta}^p = V_\alpha^p + jV_\beta^p \\ \mathbf{V}_{\alpha\beta}^n = V_\alpha^n + jV_\beta^n \\ \mathbf{I}_{\alpha\beta}^p = i_\alpha^p + j i_\beta^p \\ \mathbf{I}_{\alpha\beta}^n = i_\alpha^n + j i_\beta^n \end{cases} \quad (4)$$

式中: $V(i)$ 代表变流器交流侧电压(电流); 下标 α 、 β 代表所在坐标轴; 上标 p、n 代表正负序分量。将式(3)代入式(2)中可以得到 α - β 坐标系中储能 PCS 变流器的正、负序复合模型为

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{\alpha\beta}^p = \mathbf{E}_{\alpha\beta}^p - \left(L \frac{d\mathbf{I}_{\alpha\beta}^p}{dt} + R_s \mathbf{I}_{\alpha\beta}^p \right) \\ \mathbf{V}_{\alpha\beta}^n = \mathbf{E}_{\alpha\beta}^n - \left(L \frac{d\mathbf{I}_{\alpha\beta}^n}{dt} + R_s \mathbf{I}_{\alpha\beta}^n \right) \end{cases} \quad (5)$$

3 预测电流控制与 LVRT 策略

PCS 的 LVRT 实质是在电压跌落情况下首先防止开关器件过流、过压而损坏, 其次是保持并网运行前提下, 具备一定的功率控制能力和功能。LVRT 的实现方案体现在两个层次: 一是电压跌落时电流指令分配与切换; 二是电流的有效控制。针对电网对称和不对称两种故障, 通过改变功率外环来改变电流指令, 分别实现电压跌落时的 PCS 过电流抑制和不对称故障时负序电流控制与有功功率二倍频脉动抑制, 实现储能 PCS 的 LVRT。

采用预测电流控制算法, 即通过预测系统下一周期的输出状态而确定当前的动作指令^[20]。电网正常情况时调制电压指令为

$$\begin{cases} \mathbf{V}_\alpha^* = \mathbf{e}_\alpha - \frac{L_s}{T} [\mathbf{i}_\alpha^* - \mathbf{i}_\alpha] - R \mathbf{i}_\alpha \\ \mathbf{V}_\beta^* = \mathbf{e}_\beta - \frac{L_s}{T} [\mathbf{i}_\beta^* - \mathbf{i}_\beta] - R \mathbf{i}_\beta \end{cases} \quad (6)$$

电网电压不对称时, 式 (6) 可分解为

$$\begin{cases} \mathbf{V}_\alpha^{p*} = \mathbf{e}_\alpha^p - \frac{L_s}{T} [\mathbf{i}_\alpha^{p*} - \mathbf{i}_\alpha^p] - R_s \mathbf{i}_\alpha^p \\ \mathbf{V}_\alpha^{n*} = \mathbf{e}_\alpha^n - \frac{L_s}{T} [\mathbf{i}_\alpha^{n*} - \mathbf{i}_\alpha^n] - R_s \mathbf{i}_\alpha^n \\ \mathbf{V}_\beta^{p*} = \mathbf{e}_\beta^p - \frac{L_s}{T} [\mathbf{i}_\beta^{p*} - \mathbf{i}_\beta^p] - R_s \mathbf{i}_\beta^p \\ \mathbf{V}_\beta^{n*} = \mathbf{e}_\beta^n - \frac{L_s}{T} [\mathbf{i}_\beta^{n*} - \mathbf{i}_\beta^n] - R_s \mathbf{i}_\beta^n \end{cases} \quad (7)$$

式中: \mathbf{V}_α^{p*} 、 \mathbf{V}_β^{p*} 、 \mathbf{V}_α^{n*} 、 \mathbf{V}_β^{n*} (\mathbf{i}_α^{p*} 、 \mathbf{i}_β^{p*} 、 \mathbf{i}_α^{n*} 、 \mathbf{i}_β^{n*}) 为 α 轴和 β 轴的电压(电流)正负序指令; \mathbf{i}_α^p 、 \mathbf{i}_β^p 、 \mathbf{i}_α^n 、 \mathbf{i}_β^n (\mathbf{e}_α^p 、 \mathbf{e}_β^p 、 \mathbf{e}_α^n 、 \mathbf{e}_β^n) 为 α 轴和 β 轴的网侧电压(电流)正负序瞬时值。由式 (7) 可以看到变流器输出电流 \mathbf{i}_α 和 \mathbf{i}_β 分别只受变流器输出电压 \mathbf{V}_α 和 \mathbf{V}_β 的控制, 求得电流指令代入式 (7), 将得到的调制电压输入到 SVPWM 模块, 产生六路脉冲信号触发 PCS 变流器的功率开关就可以实现 LVRT 控制。

PCS 变流器吸收的复功率为

$$\mathbf{S} = \mathbf{p} + j\mathbf{q} = (\mathbf{e}^{j\omega t} \mathbf{E}_{dq}^p + \mathbf{e}^{-j\omega t} \mathbf{E}_{dq}^n) \cdot (\mathbf{e}^{j\omega t} \mathbf{I}_{dq}^p + \mathbf{e}^{-j\omega t} \mathbf{I}_{dq}^n) \quad (8)$$

式中: \mathbf{E}_{dq}^p 、 \mathbf{E}_{dq}^n (\mathbf{I}_{dq}^p 、 \mathbf{I}_{dq}^n) 为 d-q 坐标下电网电压(电流)正负序矢量; \mathbf{p} 、 \mathbf{q} 为 PCS 变流器吸收的有功、无功功率; ω 为同步旋转角频率。

求解式 (8) 可以得到

$$\begin{cases} p_0 = 1.5(e_\alpha^p i_\alpha^p + e_\beta^p i_\beta^p + e_\alpha^n i_\alpha^n + e_\beta^n i_\beta^n) \\ q_0 = 1.5(e_\beta^p i_\alpha^p - e_\alpha^p i_\beta^p + e_\beta^n i_\alpha^n - e_\alpha^n i_\beta^n) \\ p_{c2} = 1.5[(\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t)(e_\alpha^p i_\alpha^p + e_\beta^p i_\beta^p + e_\alpha^n i_\alpha^n + e_\beta^n i_\beta^n) - \\ 2 \sin \omega t \cos \omega t (e_\beta^p i_\alpha^p - e_\alpha^p i_\beta^p - e_\beta^n i_\alpha^n + e_\alpha^n i_\beta^n)] \\ p_{s2} = 1.5[(\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t)(e_\beta^p i_\alpha^p - e_\alpha^p i_\beta^p - e_\beta^n i_\alpha^n + e_\alpha^n i_\beta^n) - \\ 2 \sin \omega t \cos \omega t (e_\alpha^p i_\alpha^p + e_\beta^p i_\beta^p + e_\alpha^n i_\alpha^n + e_\beta^n i_\beta^n)] \\ q_{c2} = 1.5[(\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t)(e_\beta^p i_\alpha^p - e_\alpha^p i_\beta^p + e_\beta^n i_\alpha^n - e_\alpha^n i_\beta^n) - \\ 2 \sin \omega t \cos \omega t (e_\alpha^p i_\alpha^p + e_\beta^p i_\beta^p - e_\alpha^n i_\alpha^n - e_\beta^n i_\beta^n)] \\ q_{s2} = 1.5[(\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t)(e_\alpha^p i_\alpha^p + e_\beta^p i_\beta^p - e_\alpha^n i_\alpha^n - e_\beta^n i_\beta^n) - \\ 2 \sin \omega t \cos \omega t (e_\alpha^p i_\beta^n - e_\beta^n i_\alpha^n + e_\alpha^n i_\beta^p - e_\beta^p i_\alpha^p)] \end{cases} \quad (9)$$

式中: p_0 、 q_0 为有功、无功功率平均值; p_{c2} 、 q_{c2} 为二次有功余弦、正弦项峰值; p_{s2} 、 q_{s2} 为二次无功余弦、正弦项峰值。因此选择 p_0 、 q_0 、 p_{s2} 、 p_{c2} 作为控制对象, 当电网对称故障时, p_0^* 为 PCS 输入平均有功指令, 通过直接改变有功功率达到抑制网侧过电流的目的。网侧变流器要求单位功率因数运行, 取 $q_0^* = p_{s2}^* = p_{c2}^* = 0$ 。其中 p_0^* 为 PCS 输入平均有功指令, p_{s2}^* 和 p_{c2}^* 分别为 PCS 输入有功功率二倍频正弦、余弦分量指令。

当电网不对称故障时含有负序分量, 传统控制方式下输出的有功功率会发生 2 倍于电网频率的正弦波动以及直流侧电压的 2 倍频波动, 危及

变流器整体稳定性。一般希望储能电池在自我保护的同时能够向电网提供一定的无功支撑, 系统转入紧急无功支撑模式。采用直接改变功率外环指令实现 LVRT, 无功功率指令切换到储能装置所能发出的最大无功容量 q_{\max} , 此时功率指令分别是 $p_0^* = 0$, $q_0^* = q_{\max}$, $p_{s2}^* = p_{c2}^* = 0$ 。

功率指令确定以后, 即可根据式 (9) 得出所选 4 个功率指令与 α - β 坐标下正负序电流指令的关系。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^{p*} \\ i_\beta^{p*} \\ i_\alpha^{n*} \\ i_\beta^{n*} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e_\alpha^p & e_\beta^p & e_\alpha^n & e_\beta^n \\ e_\beta^p & -e_\alpha^p & e_\beta^n & -e_\alpha^n \\ e_\alpha^n & e_\beta^n & e_\alpha^p & e_\beta^p \\ e_\beta^n & -e_\alpha^n & -e_\beta^p & e_\alpha^p \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_0^* \\ q_0^* \\ p_{c2}^* \\ p_{s2}^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: 用 M_E^{-1} 表示逆矩阵。把式 (10) 代入式 (7), 可以得到储能 PCS 在电网故障条件下基于预测电流的 LVRT 控制策略, 如图 3 所示。该策略分为两层: 一是工况切换及电流指令的计算与限流部分; 二是电流的跟踪控制部分。图中 E_s 为网侧电压幅值, E_0 为额定电压。正常时刻两者是相等的, 此时开关位于 1 位, 当出现对称 (不对称) 故障时 E_s 小于 E_0 , 指令切换开关动作至 2 位, 转入无功支撑模式。由于对储能 PCS 的建模是正负序复合模型, 因此当电网出现不对称故障负序分量时该方案依然可以通过对负序量的控制实现不对称 LVRT。

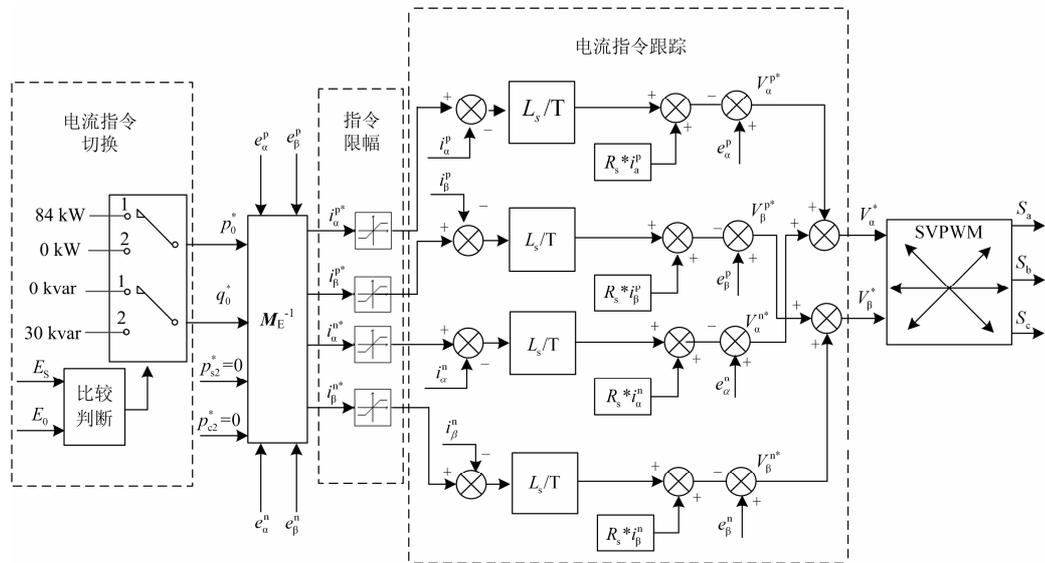


图 3 α - β 坐标系下基于预测电流的 LVRT 控制策略

Fig. 3 The LVRT control strategy based on predictive current in α - β coordination

4 仿真分析

本文基于 PSCAD/EMTDC 建立了储能 PCS 仿真模型及相应的电网模型，对所提控制策略进行了仿真验证。仿真模型参数为：蓄电池组额定功率：84 kW；电网电压：380 V；电网系统阻抗：0.005 Ω；PCS 直流侧电压：714 V；开关频率：3.2 kHz；交流侧滤波电感：0.000 95 mH；交流侧滤波电容：140 μF；直流储能电容：5 040 μF。

仿真需要验证本文方法对于对称及不对称性电网故障下的有效性，通过变压器一次侧电阻接地的方式模拟不同类型的故障（表 1）。在 1 s 时发生故障，持续时间为 1 s，在 2 s 时刻恢复正常。综合考虑模型中所采用电力电子器件的最大通态电流为 450 A。

表 1 故障设置
Table 1 Fault setting

故障类型（接地）	短路阻抗/Ω	电网电压/kV
三相跌落至 20%	0.001 25	0.076
A 相跌落至 20%	0.001 1	0.060-0.081

4.1 对称故障仿真

图 4 为故障时刻未加入 LVRT 控制策略的波形图，可以看到电流达到 1 000 A，已经完全超过变流器的最大允许值（450 A），危害变流器。图 5 为故障时刻加入 LVRT 控制策略，切换功率运行模式，开关从 1 位到 2 位，切换功率运行模式开关从 1 位到 2 位，储能电池转入无功运行模式，按照蓄电池的最大允许值进行无功支撑。可以看到此时交流电

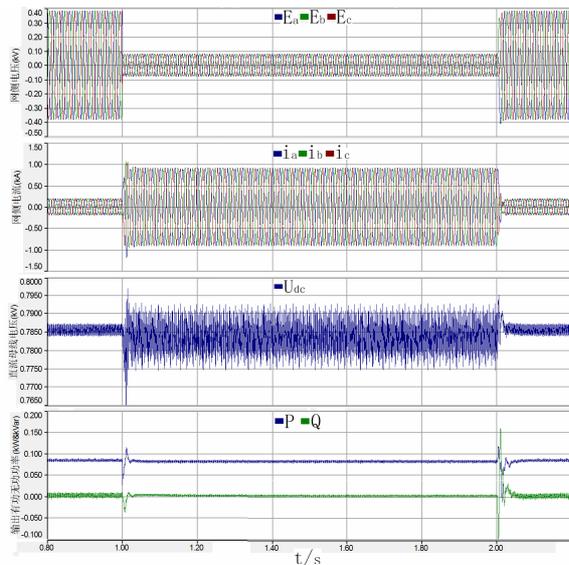


图 4 未加入 LVRT 控制策略波形

Fig. 4 Waveforms not joined LVRT control strategy

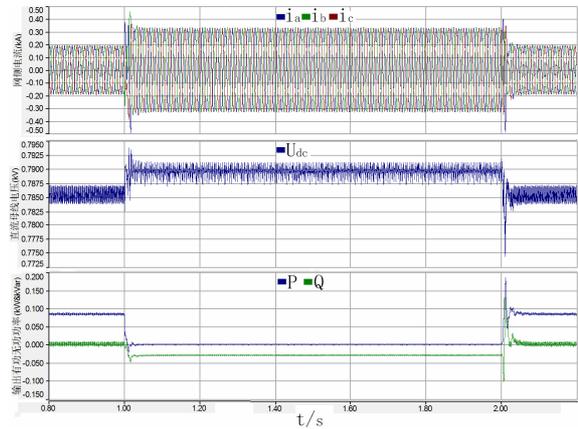


图 5 加入 LVRT 控制策略波形

Fig. 5 Waveforms joined LVRT control strategy

流大小得到有效的抑制，幅值限定在 300 A 左右，满足变流器的控制要求，实现了储能 PCS 的对称 LVRT。

4.2 不对称故障仿真

图 6 为电网发生 A 相接地时未加入不对称 LVRT 控制策略的波形图，可以看到故障电流达到 600 A，完全超过变流器的最大允许值（450 A），且直流母线电压出现波动，有功功率的 2 倍频波动明显，严重影响电网的电能质量和变流器的安全运行。图 7 为故障时刻加入不对称 LVRT 控制策略波形，与图 6 相比可以看到此时交流电流大小抑制在 100 A，直流母线电压波动减小了，有功和无功功率的倍频分量也得到抑制。但是由于电池系统向电网发出的有功功率减小，因此，直流母线电压有所上升，但没有超过限值。验证了本文关于电网电压不对称条件下 PCS 的 LVRT 控制策略的正确性。

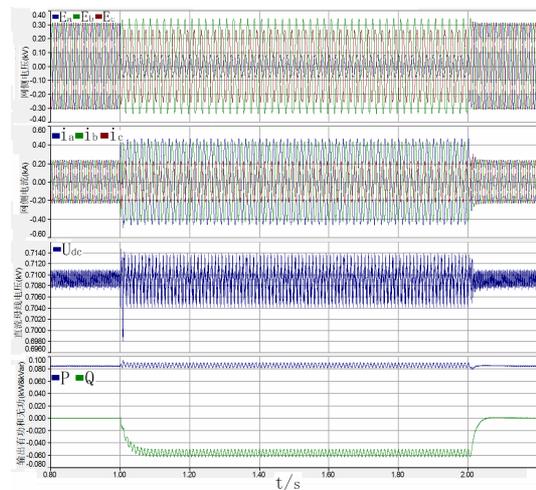


图 6 未加入不对称 LVRT 控制策略波形

Fig. 6 Waveforms not joined unbalanced LVRT control strategy

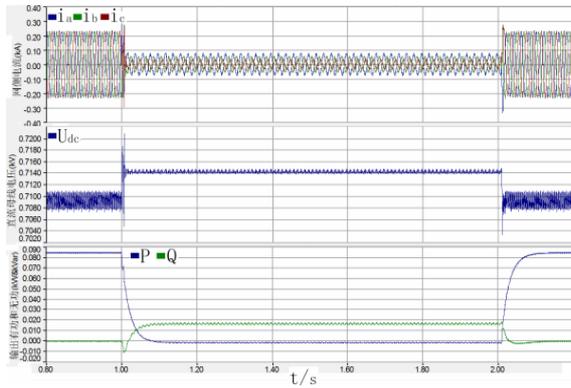


图 7 加入不对称 LVRT 控制策略波形

Fig. 7 Waveforms joined unbalanced LVRT control strategy

5 实验结果

5.1 对称故障实验工况

在已有控制策略经过仿真验证之后, 又将该策略移植到硬件设施中进行实验。采用的实验工况为: 电池储能系统按 1 MW 为一个单元设计, 每 1 MW 的储能系统由 4 个 500 kW/0.75 MWh 电池储能单元组成, 其中每个电池储能单元包含 1 台 500 kW 的 PCS, 用以实现储能电池与电网之间的能量双向传递。

全系统由 3 个这样的 1 MW 单元构成, 最终每个单元通过隔离升压变, 汇流于 35 kV 电网。500 kW PCS 的拓扑由 6 个 84 kW 的标准功率模块组成, 每个功率模块的直流侧作为 1 组输入。电池系统共分为 6 组, 分别接到 PCS 的 6 组直流输入上, PCS 装置的所有功率模块的交流侧并联在一起, 通过内部隔离变压器接入 380 V 电网, 如图 8 所示。

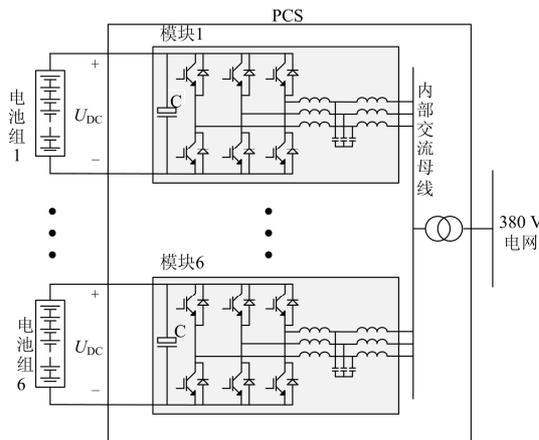


图 8 500 kW PCS 拓扑实验图

Fig. 8 500 kW PCS topology

5.2 对称故障实验波形

储能 PCS 三相对称跌落波形说明: 在 2 s 时发生故障, 持续时间为 1 s, 在 3 s 时刻系统恢复正常, 如图 9。故障发生后, PCS 往外发出 10 kvar 无功功

率。在电压恢复时, 停止发无功, 并在故障恢复后 100 ms 后恢复有功输出。图 7 中 CH1 为网侧电压, CH9, CH10, CH11 分别为网侧三相电流。从所得的实验波形中可以看到该策略应用到实际装置中依然是可行的, 尤其是图 10, 在故障时刻可以很好地抑制网侧电流防止越限; 图 11 可以看出, 在故障退出时刻可以快速平稳地过渡到稳态工作状态。

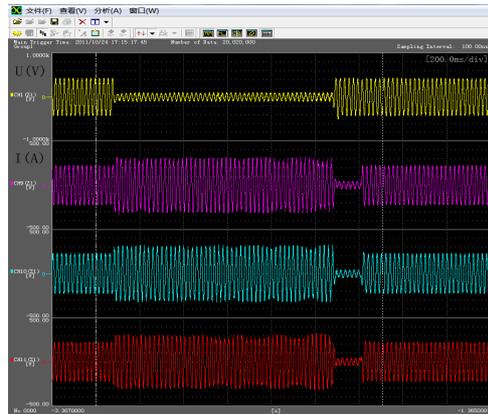


图 9 故障时刻电网电压电流整体波形

Fig. 9 Waveforms not joined LVRT control strategy

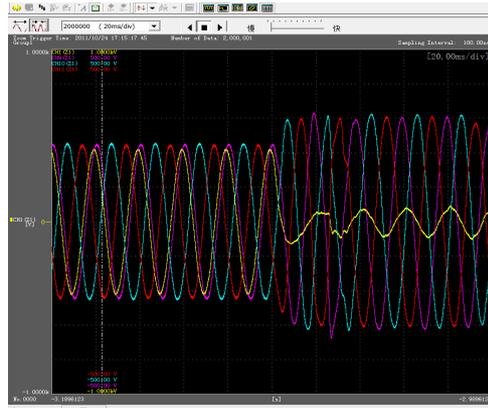


图 10 故障瞬间电网电压电流局部波形

Fig. 10 Detail waveforms not joined LVRT control strategy

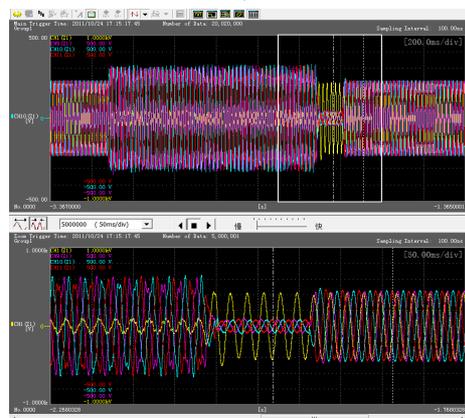


图 11 故障恢复时刻电网电压电流波形

Fig. 11 Voltage and current waveforms of fault recovery moment

可以看到此时交流电流大小得到有效的抑制, 满足变频器的控制要求, 实现了储能 PCS 的对称 LVRT。

6 结论

本文建立了基于 α - β 坐标系的电网不对称条件下 PCS 预测电流的控制策略, 使得在电网对称和不对称的低电压情况下 ESS 都能够实现 LVRT。控制策略基于 α - β 坐标无需多重坐标变换, 不涉及锁相环, 大大减少了算法复杂性。采用直接功率控制来达到抑制倍频分量的影响, 实现方便, 完全适用于目前研究为较少的不对称 LVRT。使 PCS 能够对电网进行无功支撑, 帮助电网电压恢复。且在实现 LVRT 过程中 ESS 没有增设硬件装置, 不仅提高了储能电池运行的可靠性, 还具有很好的经济效益。仿真结果表明, 该控制策略能在电网故障情况下能对储能 PCS 进行有效控制; 同时经过实际设备的实验验证, 进一步证实了本文中提出的控制策略是一种颇具应用价值的控制方案。

参考文献

- [1] 邱培春, 葛宝明, 毕大强. 基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 29-32.
QIU Pei-chun, GE Bao-ming, BI Da-qiang. Battery energy storage-based power stabilizing control for grid-connected photovoltaic power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 29-32.
- [2] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 147-150.
ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 147-150.
- [3] 姚勇, 朱桂萍, 刘秀成. 电池储能系统在改善微电网电能质量中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 85-89.
YAO Yong, ZHU Gui-ping, LIU Xiu-cheng. Improvement of power quality of micro-grids by battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 85-89.
- [4] 李军徽, 朱昱, 严干贵, 等. 储能系统控制策略及主电路参数设计的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 7-11.
LI Jun-hui, ZHU Yu, YAN Gan-gui, et al. Research on the control strategy and the design of main circuit parameters of energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 7-11.
- [5] 张坤, 毛承雄, 陆继明, 等. 基于储能的直驱风力发电系统的功率控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 7-14.
ZHANG Kun, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al. Power control strategy of directly driven wind turbine with energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 7-14.
- [6] 侯桂欣, 刘其辉, 谢孟丽. 对称及不对称电网故障下的电池储能系统低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 62-69.
HOU Gui-xin, LIU Qi-hui, XIE Meng-li. The LVRT of the BESS under both balance and unbalance grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 62-69.
- [7] 叶盛, 黄守道, 黄科元, 等. 不对称电压下 PWM 整流器的控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 94-98.
YE Sheng, HUANG Shou-dao, HUANG Ke-yuan, et al. Control strategy of pulse width modulation rectifier under asymmetrical input voltages[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 94-98.
- [8] 廖怀庆, 刘东, 黄玉辉, 等. 考虑新能源发电与储能装置接入的智能电网转供能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 9-16.
LIAO Huai-qing, LIU Dong, HUANG Yu-hui, et al. Smart grid power transfer capability analysis considering integrated renewable energy generations and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 9-16.
- [9] 李玉玲, 鲍建宇, 张仲超. 间接电流控制可调功率因数电流型 PWM 变流器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 49-53.
LI Yu-ling, BAO Jian-yu, ZHANG Zhong-chao. Indirect current control adjustable power factor current source PWM converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 49-53.
- [10] 甄晓亚, 尹忠东, 王云飞, 等. 太阳能发电低电压穿越技术综述[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(8): 64-68.
ZHEN Xiao-ya, YIN Zhong-dong, WANG Yun-fei, et al. Overview of low voltage ride through in photovoltaic power generation[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(8): 64-68.
- [11] 王金良. 风能、光伏发电与储能[J]. 电源技术, 2009,

- 33(7): 628-632.
WANG Jin-liang. Wind energy, photovoltaic generation and energy storage[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2009, 33(7): 628-632.
- [12] 丁明, 徐宁舟, 林根德. 电池储能电站静态功能的研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 242-248.
DING Ming, XU Ning-zhou, LIN Gen-de. Static function of the battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 242-248.
- [13] 吴晋波, 文劲宇, 孙海顺, 等. 基于储能技术的交流互联电网稳定控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 261-267.
WU Jin-bo, WEN Jin-yu, SUN Hai-shun, et al. Study of control method for improving AC interconnected grid stability based on energy storage technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 261-267.
- [14] MORREN J, PIERIK J T G, DE HAAN S W H. Voltage dip ride-through control of direct-drive wind turbines[C] // Proceedings of the 39th International Universities Power Engineering Conference, Bristol, UK, September 6-8, 2004: 934-938.
- [15] ABBEY C, JOOS G. Effect of low voltage ride through (LVRT) characteristic on voltage stability[C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, CA, USA, June 12-16, 2005, 2: 1901-1907.
- [16] LI Wei, ABBEY C, JOOS C. Control and performance of wind turbine generators based on permanent magnet synchronous machines feeding a diode rectifier[C] // Proceedings of the 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Korea, June 18-22, 2006: 1-6.
- [17] 赵紫龙, 吴维宁, 王伟. 电网不对称故障下直驱风电机组低电压穿越技术[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 87-91.
ZHAO Zi-long, WU Wei-ning, WANG Wei. A low voltage ride through technology for direct-drive wind turbines under unbalanced voltage dips[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 87-91.
- [18] 国家电网公司企业标准. Q/GDW 617-2011 光伏电站接入电网技术规定[S].
The China State Grid Corp Enterprise Standard. Q/GDW 617-2011 technical rule for photovoltaic power station connected to power grid[S].
- [19] XU Lie, ANDERSON B R, CARTWRIGHT P. VSC transmission operating under unbalanced AC conditions-analysis and control design[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 427-434.
- [20] 代云中, 许建平, 杨平, 等. 基于预测电流控制的四象限变流器研究[J]. 机车电传动, 2010(6): 16-20.
DAI Yun-zhong, XU Jian-ping, YANG Ping, et al. Research of four-quadrant converter based on predictive current control[J]. Electric Drive for Locomotives, 2010 (6): 16-20.

收稿日期: 2013-05-21; 修回日期: 2014-01-08

作者简介:

刘其辉(1974-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源发电与并网技术; E-mail: liuhuiwei@163.com

葛立坤(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电与并网技术; E-mail: gelikun89@126.com

郭晓芸(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电与并网控制。