

非理想电网下T型三电平储能变流器控制策略

周京华¹, 宋强¹, 张海东¹, 李津²

(1. 北方工业大学北京市变频技术工程技术研究中心, 北京 100144;

2. 北京安普能电气技术有限公司, 北京 100000)

摘要:针对三相电网电压不平衡或因短路引起的电压跌落等问题对储能变流器造成的影响,提出双级型T型三电平储能变流器在非理想电网条件下的控制策略。该策略以储能变流器并网电流平衡和电网故障期间设备不脱网运行为目标,设计基于双旋转坐标系下的非理想电网控制策略,通过对负序电流进行抑制和对直流侧功率进行降额,保证在电网不平衡情况下,实现交流电流平衡输出以及设备在电网故障下的低电压穿越控制。实验结果验证了提出的非理想电网控制策略的有效性。

关键词:双级型储能变流器;T型三电平;非理想电网;负序电流抑制;低电压穿越

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**DOI:10.19457/j.1001-2095.dqed19282

Control Strategy for Three-level T-type Power Conversion System Under Non-ideal Grid

ZHOU Jinghua¹, SONG Qiang¹, ZHANG Haidong¹, LI Jin²

(1. *Inverter Technology Engineering Research Center of Beijing, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. Beijing Anpuneng Electric*

Technology Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: For the influence of three-phase power grid voltage imbalance or voltage drop due to short circuit on energy storage converters, the control strategy of two-stage T-type three-level energy storage converter under non-ideal power grid conditions was proposed. The strategy aimed at grid-connected current balancing of energy-storage converters and non-off-grid operation during grid faults. The non-ideal grid control strategy based on dual-rotational coordinate system was designed, by suppressing the negative sequence current and derating the power of the DC side, that can guarantee the balanced output of the alternating current and the low-voltage ride-through control of the equipment under the grid fault in case of unbalanced power grid. The experiment results verify the effectiveness of the proposed control strategy under non-ideal power grid.

Key words: two-stage type power conversion system; T-type three-level; non-ideal grid; suppress negative sequence current; low-voltage ride through

当前,光储微电网在生产生活中的应用越来越广,由于其能够实现光伏发电的平滑输出,调节微网系统功率,受到极大重视。储能变流器(power conversion system, PCS)作为光储微电网系统的核心设备之一,其控制的好坏对光储系统乃至整个电网的稳定起着决定性作用^[1]。

在实际应用中,电网电压不平衡现象较为严重,如果此时仍沿用理想电网条件下的控制策略,会导致直流母线产生二倍频波动,也容易造成设备过流保护^[2]。对于小功率设备,电网出现问题,设备可以直接进行停机保护,但是对于大功率储能装置来讲,如果直接停机,会对电网造

基金项目:国家自然科学基金(51777002);北京市高水平创新团队建设计划(IDHT20180502);

北方工业大学科技创新工程计划(18XN141)

作者简介:周京华(1974—),男,博士,教授,Email:zjh@ncut.edu.cn

成影响,甚至导致电网故障恶化。因此,在国家电网2011年颁布的《光伏电站接入电网技术规定》(Q/GDW617—2011)中加入了低电压穿越的要求,具体如下:

1)储能变流器并网点电压跌至0时,储能变流器能够保证不脱网连续运行0.15 s;

2)储能变流器并网点电压跌至曲线1以下时,储能变流器可以从电网切出;

3)储能变流器在电网故障自动清除后,其有功功率需以30%额定功率/秒的增速快速恢复至故障前的值。

标准中具体要求的设备低电压穿越耐受能力如图1所示。

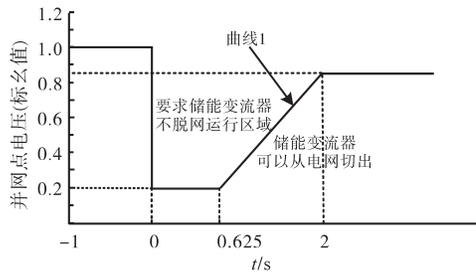


图1 储能变流器低电压耐受能力要求
Fig.1 Low voltage tolerance requirements for energy storage converters

在低电压穿越过程中,设备控制策略需保证其各状态间的平稳过渡和稳定运行。

为了解决在非理想电网下的设备控制问题,文献[3]针对电网电压跌落,并网变换器输出功率的控制要求,提出了有功功率和无功功率的5种电流控制策略,但由于控制目标太多,且各个被控量之间存在耦合关系,所以不易同时实现相应功率控制;文献[2]就上述功率控制的缺陷提出了灵活功率控制策略,将5种电流参考指令通过2个参数取值不同,来实现相应的功率控制,这种功率控制策略虽然可以有效抑制电网电压跌落时有功功率二倍频波动,也可以保证一定无功功率支撑,但是2个参数的选取范围具有一定的限制,并且当参数变化时输出的电流质量也会随之变化,无法保证并网电流质量。然而,上述文献都是基于光伏逆变器或者单级型储能变流器来进行说明的,对双级型储能变流器的控制研究很少。

针对双级型储能变流器,本文提出一种在双旋转坐标系下的非理想电网控制策略,通过对负序电流和直流侧功率进行控制,保证在非理想电网条件下,设备能够稳定并网运行,且三相电流保持平衡输出。

1 储能变流器的拓扑结构

储能变流器按照是否具有DC/DC环节通常分为单级型、双级型两种^[4]。

本文采用的是双级型T型三电平储能变流器,和单级型储能变流器相比,双级型结构由于多一级DC/DC环节,使得电池工作电压范围比单级型拓扑结构更加宽泛,应用范围更广,其拓扑结构如图2所示。

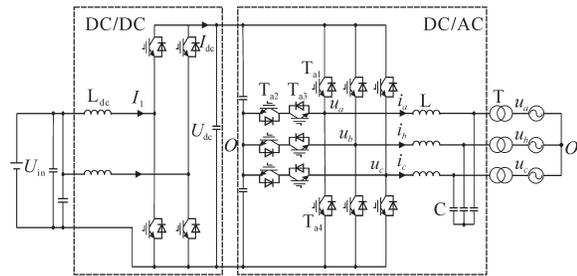


图2 双级型储能变流器拓扑
Fig.2 Topology of dual-stage PCS

图2所示双级型拓扑中,DC/DC变换器采用双重化并联交错式结构,可有效减小输出直流电流纹波,并利用单电流环控制直流侧电流的方向和大小。DC/AC变换器采用T型三电平结构,相比于传统的两电平结构增加了输出电平数量,进而减小了交流侧滤波器硬件体积。

2 非理想电网下的控制策略

电网通常都存在小幅度的三相电压不平衡情况,一般不会对PCS造成影响,但当整个系统接入大功率三相不平衡负载或者电网发生三相短路、不对称短路故障时,会导致更为严重的电网电压不平衡甚至大幅度跌落,如果在这种电压状态下不对设备进行控制,容易导致设备直接停机,甚至对电网造成影响。本文将主要从三相不平衡和电压大幅度跌落两种状态来介绍非理想电网下的控制策略。

2.1 电网不平衡条件下的锁相环

设备在并网过程中,控制系统需要获取电网电压的相位信号,这一过程被称为锁相。在理想电网下,经常采用单同步参考坐标系锁相环,其控制框图如图3所示^[5]。然而,在电网电压不平衡情况下,传统的锁相方式已经不适用,容易造成锁相不准确,导致并网电流畸变,为避免并网控制出现问题,需要对传统锁相环进行改进。在电网电压不平衡情况下,三相电压正序基频分量

保持不变,因此本文采用基于正序基波分量的锁相方式,其控制框图如图4所示。

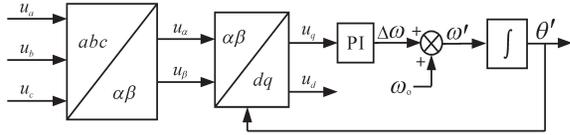


图3 单同步参考坐标系锁相环控制

Fig.3 Single synchronous reference coordinate system phase-locked loop control

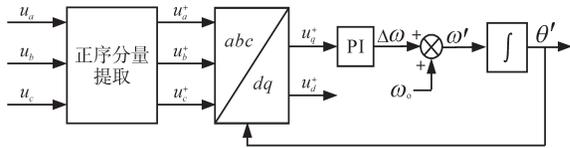


图4 基于正序基波分量的锁相环

Fig.4 Phase-locked loop based on positive sequence fundamental component

2.1.1 正、负序分离

为了提取电网电压基波正序分量,首先需要对三相电压进行正、负序分离^[6]。

三相电网电压一般可分解为正序电压、负序电压和零序电压,而本文采用的是三相三线制变换器,不存在零序,因此不考虑零序电压分量的影响,则电网电压可分解为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = U_s^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi^+) \\ \cos(\omega t + \varphi^+ - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \varphi^+ + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + U_s^- \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^-) \\ \cos(-\omega t + \varphi^- - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(-\omega t + \varphi^- + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U_s^+ , U_s^- 分别为电网电压正序分量和负序分量幅值; φ^+ , φ^- 分别为电网电压正序、负序初相位; ω 为电网电压基波角频率。

对式(1)进行Clarke变换,可将其改写为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = U_s^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi^+) \\ \sin(\omega t + \varphi^+) \end{bmatrix} + U_s^- \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi^-) \\ \sin(\omega t + \varphi^-) \end{bmatrix} \quad (2)$$

对式(2)进行dq坐标变换,可得:

$$\begin{bmatrix} u_d^+ \\ u_q^+ \end{bmatrix} = T_{dq}^+ \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = U_s^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi^+ - \theta') \\ \sin(\omega t + \varphi^+ - \theta') \end{bmatrix} + U_s^- \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi^- - \theta') \\ \sin(\omega t + \varphi^- - \theta') \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_d^- \\ u_q^- \end{bmatrix} = T_{dq}^- \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = U_s^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi^+ + \theta') \\ \sin(\omega t + \varphi^+ + \theta') \end{bmatrix} + U_s^- \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^- + \theta') \\ \sin(-\omega t + \varphi^- + \theta') \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中

$$T_{dq}^+ = \begin{bmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix}$$

$$T_{dq}^- = \begin{bmatrix} \cos \theta' & -\sin \theta' \\ \sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix}$$

式中: T_{dq}^+ 为正序 2s/2r 变换矩阵; T_{dq}^- 为负序 2s/2r 变换矩阵。

基于上述变换,电网电压被表示为正序、负序电压之和。

2.1.2 解耦双同步参考坐标系锁相环

在非理想电网情况下,由于电网电压存在负序分量,此时如果锁相环直接采集电压正序分量作为反馈量进行锁相,会受到负序电压的干扰而导致锁相失败^[7],因此本文采用双同步旋转坐标系下解耦的方法来提取独立的正序q轴电压分量,并进行锁相,其控制框图如图5所示。

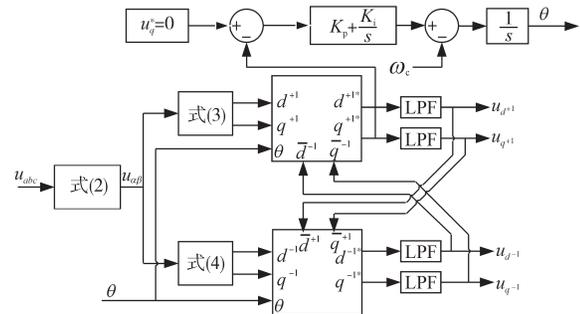


图5 解耦双同步参考坐标系锁相环控制

Fig.5 Decoupling of dual synchronous reference coordinate system phase-locked loop control

2.2 非理想电网条件下的控制策略

为实现三相并网电流平衡和设备在电网故障期间不脱网运行的控制目标,本文在传统电压电流双闭环控制策略上进行改进。下面,根据电压跌落程度来对非理想电网下的控制策略进行介绍。

2.2.1 电网电压不平衡下的控制策略

一般来说,电压跌至额定值的90%以下时,设备停机保护或者进行低电压穿越控制,而没有超过这个限值时,设备不能停机,所以在这个电压等级下的电网电压不平衡控制非常重要。

由上文可知,在电压不平衡条件下,三相电压可分解为正序、负序电压。根据式(3),式(4)可以得到设备在d-q坐标系下的有功和无功

率,其方程为

$$\begin{cases} P_0 = \frac{3}{2}(u_d^+ i_d^+ + u_q^+ i_q^+ + u_d^- i_d^- + u_q^- i_q^-) \\ P_{c2} = \frac{3}{2}(u_d^+ i_d^- + u_q^+ i_q^- + u_d^- i_d^+ + u_q^- i_q^+) \\ P_{s2} = \frac{3}{2}(u_q^- i_d^+ - u_d^- i_q^+ - u_q^+ i_d^- + u_d^+ i_q^-) \\ Q_0 = \frac{3}{2}(u_q^+ i_d^+ - u_d^+ i_q^+ + u_q^- i_d^- - u_d^- i_q^-) \\ Q_{c2} = \frac{3}{2}(u_q^+ i_d^- + u_d^+ i_q^- - u_q^- i_d^+ - u_d^- i_q^+) \\ Q_{s2} = \frac{3}{2}(u_q^- i_d^- - u_d^- i_q^- + u_q^+ i_d^+ - u_d^+ i_q^+) \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_d^+, u_q^+ 为正序电压 d, q 轴分量; u_d^-, u_q^- 为负序电压 d, q 轴分量; i_d^+, i_q^+ 为正序电流 d, q 轴分量; i_d^-, i_q^- 为负序电流 d, q 轴分量。

此时,令 $i_d^- = 0, i_q^- = 0$,且仅考虑平均有功、无功功率 P_0, Q_0 ,即令 $P_{c2} = P_{s2} = Q_{c2} = Q_{s2} = 0$,代入式(5),得到功率给定为

$$\begin{cases} P_0^* = 1.5(u_d^+ i_d^+ + u_q^+ i_q^+) \\ Q_0^* = 1.5(u_q^+ i_d^+ - u_d^+ i_q^+) \end{cases} \quad (6)$$

实际控制中,由于直流母线的变化情况和有功功率相关,因此在双环控制下,有功功率指令由电压外环来给定,并得到相应计算公式为

$$P_0^* = \frac{3}{2} [(K_p + \frac{K_i}{s})(U_{dc}^* - U_{dc})] u_d^+ \quad (7)$$

式中: K_p, K_i 为PI调节器的比例、积分系数; U_{dc}^* 为直流母线电压给定。

通过功率计算公式可以得到 $d-q$ 坐标系下的电流指令值为

$$\begin{bmatrix} i_d^{*+} \\ i_q^{*+} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \times \frac{1}{(u_d^+)^2 + (u_q^+)^2} \begin{bmatrix} u_d^+ & u_q^+ \\ u_q^+ & -u_d^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^* \\ Q_0^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

得到 i_d^+, i_q^+ 之后,将其作为电流环给定送入控制系统,具体的抑制并网负序电流分量控制策略框图如图6所示。

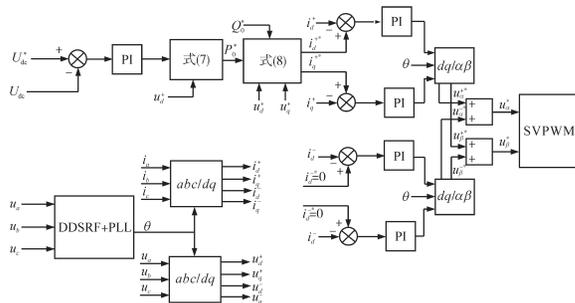


图6 抑制并网负序电流分量控制策略

Fig.6 The control strategy to restrain grid-connected negative-sequence current

图6中,三相电压和电流经过正、负序分离分解为 $u_d^+, u_q^+, u_d^-, u_q^-, i_d^+, i_q^+, i_d^-, i_q^-$,通过与电压外环输出进行计算,得到正序电流内环给定值,而负序电流给定值则为0,之后通过PI调节器进行闭环调节,就可以将负序电流调节至0,从而在三相电网电压不平衡的情况下,实现了设备对负序电流的抑制,保证输出电流的三相平衡。

2.2.2 低电压穿越控制策略

当电网发生较为严重的跌落故障时,如果没有相应的措施,交流侧三相电流会在瞬间发生较大抬升,导致设备过流保护而停机,对变流器造成损坏,如果存在大规模的设备停机,则会增加电网恢复难度,甚至加剧电网故障^[9]。即使能够将交流侧电流通过电流限值抑制到一定值,但是会导致直流母线的大幅度抬升,仍会对设备造成损坏。因此,当前的并网规则要求并网设备应该具有低电压穿越能力,即保证在电压故障期间,设备能够不停机并网运行。

根据故障穿越要求,设备在低电压穿越期间的控制目标可选取为^[9]:1)穿越期间能保持直流母线电压的稳定;2)设备能够不间断并网运行;3)三相电流能够平衡输出。因此,本文提出基于双旋转坐标系下低电压穿越控制策略,并在控制中加入了三相电压不平衡下的控制,能够保证电压出现不对称跌落时,设备也能穿过低压故障,具体控制框图如图7所示。

由图7可以看出,本策略对并网双环控制进行改进,保持整体框架不变,交流侧电流给定加限值,保证在电压跌落瞬间,电流不会直接上升至设备过流保护,而电流给定由电压环提供,不需要断开电压外环,实现在穿越期间设备直流母线的稳定,而为了保证在故障期间的设备安全,在低电压穿越期间,需要对设备进行降额控制,本文在DC/DC侧进行恒流控制,因此发生低电压故障时,给定一个新的电流指令,即

$$I_{ref}^* = h \times U_{min} \times I_{ref} \quad (9)$$

式中: I_{ref}^* 为电流指令; U_{min} 为三相电网电压标么后的最小值; I_{ref} 为电网跌落前的储能功率变换器的指令电流; h 为降额校正系数。

通过式(9),可以在电压跌落时,降低设备的有功输出,保证了电压跌落期间,交流侧电流的正常输出以及直流侧和交流侧功率的平衡,并通过电压外环的作用,使得直流母线能够平稳过渡。

当电网发生对称跌落时,电网电压只有正序

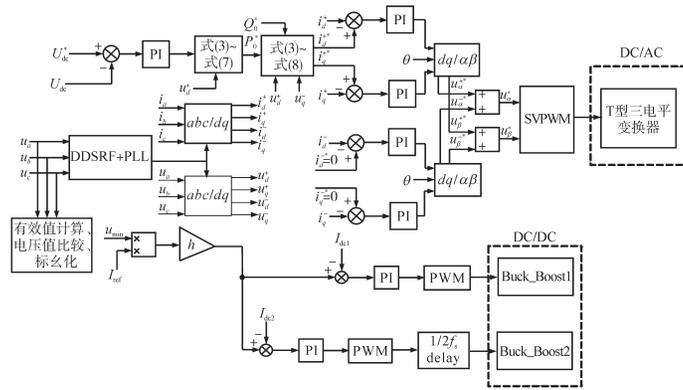


图7 基于双旋转坐标系下的低电压穿越控制框图

Fig.7 Control diagram of low voltage ride through based on double rotating coordinate system

分量,交流侧可以按照正常低电压穿越模式并网,当发生不对称跌落时,设备可以按照2.2.1节的策略进行不平衡控制。

通过上述控制,设备在低电压穿越期间可以很好地实现前面所说故障穿越控制目标,并且如果电压在规定时间内能够恢复,则设备会以一定斜率进行斜坡启动,恢复到故障前的状态,如果不能恢复,设备也能根据标准进入停机状态。

3 实验验证

3.1 电网不平衡条件下的实验波形

实验条件为直流输入为200 V,直流母线为400 V,交流线电压输出为200 V,直流侧电流为20 A。在实验过程中,设备首先正常并网,之后在 t_1 时刻,A相电压变为额定值的92%,C相电压变为额定值的108%,B相电压保持不变,如果不加不平衡控制策略,得到如图8所示波形。

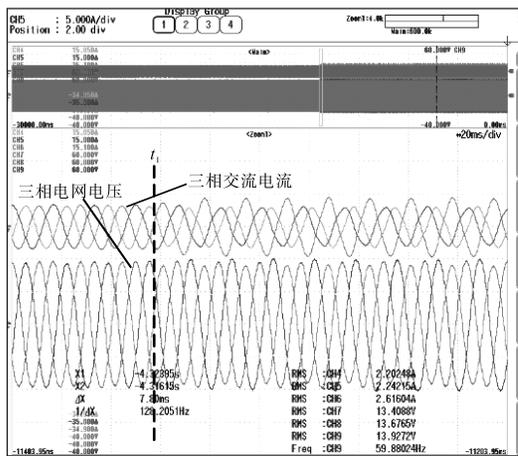


图8 不加不平衡策略下的实验波形

Fig.8 Experiment waveforms without adding unbalance strategy

由图8可以看到,在不加控制策略的情况下,电网电压不平衡时,逆变输出侧电流发生畸变,相位也出现偏移,如果不对其进行抑制,容易导

致设备交流侧过流,进而导致故障停机,严重的则会对设备造成损坏。

加入非理想控制策略,得到如图9所示实验波形。

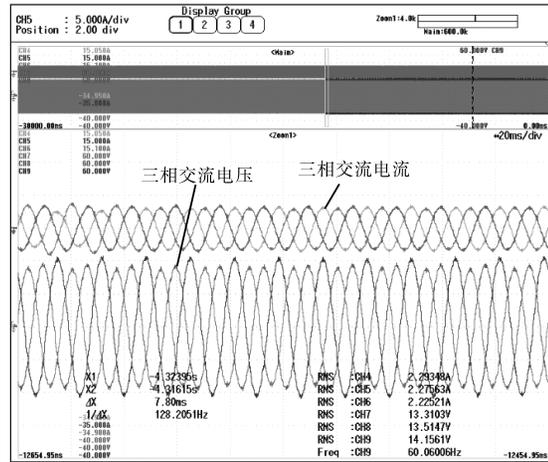


图9 加入不平衡控制策略的实验波形

Fig.9 Experiment waveforms after adding unbalance control strategy

由图9看出,在加入不平衡控制策略之后,设备交流侧电流三相平衡,且设备能够正常运行,证明了不平衡控制策略的有效性。

3.2 低电压穿越实验

以上述同样实验条件,进行电网电压对称跌落的低电压穿越实验,实验结果如图10所示。

由图10可以看出,当电网电压发生对称跌落时,设备功率下降,交流侧电流降低,设备开始穿越低电压故障,当电网电压恢复后,设备功率能够缓慢增至故障前的功率等级。

之后进行三相电压不平衡跌落下的低电压穿越实验,在 t_1 时刻电网电压A相、B相、C相分别跌落至额定值的80%,70%,60%,在 t_2 时刻电网电压恢复正常,实验波形如图11所示。

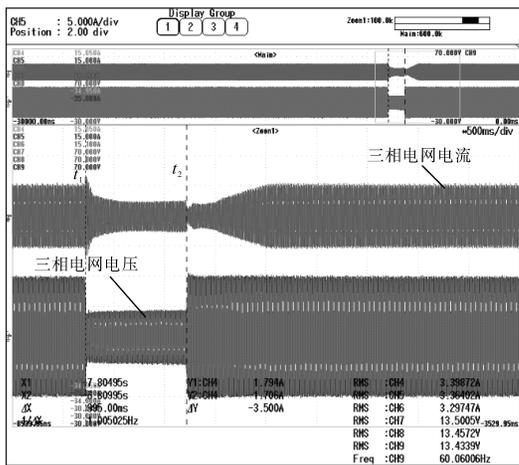
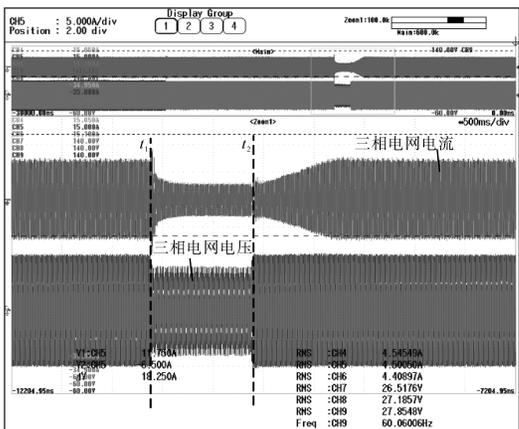
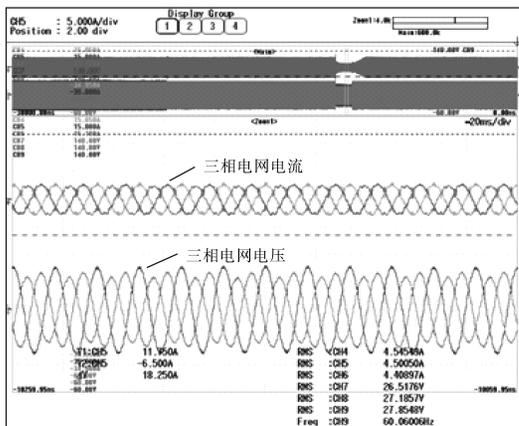


图10 电压跌落至40%的低电压穿越波形

Fig.10 Low voltage crossing waveform of voltage drop to 40%



(a)不平衡电压跌落的低电压穿越波形



(b)跌落期间的电压电流波形

图11 电压不平衡跌落的低电压穿越

Fig.11 Low voltage crossing of voltage imbalance

由图11可以看出,当电网电压发生不对称跌落,为防止直流母线电压抬升和交流输出过流,储能功率变换器交流输出功率降为原来的50%,并在电网电压不对称期间稳定运行,三相电

流处于平衡状态。

4 结论

本文针对三相电网电压不平衡或因短路引起的电压跌落等问题对储能变流器造成的影响,提出双级型T型三电平储能变流器在非理想电网条件下的控制策略,并对双级型储能变流器拓扑结构、非理想电网下锁相环以及低电压穿越控制进行了介绍和研究。

研究结论如下:1)在电网发生对称跌落时,提出的控制策略能有效满足低电压穿越的控制目标;2)在发生不对称跌落时,该控制能保证设备低电压穿越的同时,三相交流电流平衡输出。由此证明了本文提出控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 卢胜利,鞠文耀,贾中璐.一种双向储能变流器并网控制策略研究[J].电力电子技术,2013,47(6):41-43.
- [2] 杨振兴,魏艳君,徐晓蒙,等.电网电压不平衡下并网逆变器功率灵活控制[J].电力电子技术,2015,49(12):42-45.
- [3] 漆汉宏,王晓娜,魏艳君,等.消除有功振荡的改进低电压穿越方法[J].电工技术学报,2014,29(s1):416-423.
- [4] Yang L, Chen Y, Luo A, et al. Second Ripple Current Suppression by Two Band-pass Filters and Current Sharing Method for Energy Storage Converters in DC Microgrid[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(3): 1031-1044.
- [5] 乔和,张文斌,于浩,等.非理想条件下的电网同步锁相技术[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(7):98-102.
- [6] 孙伟莎,程启明,程尹曼,等.电网电压不平衡及谐波畸变时基波电压正负序分量分离新方法[J].电机与控制应用,2017,44(10):94-101.
- [7] 李波波,李守智,张艳肖.光伏并网发电低电压穿越的一种新锁相方法[J].系统仿真学报,2018,30(6):2328-2334.
- [8] Shi Kai, Ye Haihan, Xu Peifeng. Low-voltage Ride Through Control Strategy of Virtual Synchronous Generator Based on the Analysis of Excitation State[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(9): 2165-2172.
- [9] 王京保,李辉,张娟.电网电压不平衡时光伏并网逆变器低电压穿越技术[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(11): 111-116.

收稿日期:2018-07-10
修改稿日期:2018-08-07