

## 海上风电场 VSC-HVDC 并网不对称故障负序电流控制

张广明, 田 炜

(南京南瑞集团公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**基于大型海上风电场通过柔性直流输电并网系统,分析研究了柔性直流输电系统的数学模型和控制策略。针对交流电网侧发生不对称故障时产生负序电流,采用延时法进行正负序分解,进而对正负序电流单独控制,提出了负序电流控制策略,抑制不对称故障时产生的负序分量。基于 PSCAD 平台搭建了仿真模型,仿真实验验证了所提策略可以很好地抑制负序电流。

**关键词:**海上风电场;柔性直流输电;不对称故障;负序电流

**中图分类号:**TM 614;TM 71

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2014)06-0007-05

我国风能资源丰富,尤其是海上风力发电资源,东部沿海适合营建大型海上风电场。长距离、大规模海上风电场的并网给电网稳定运行带来的巨大的挑战<sup>[1]</sup>。由于海底电缆的充电功率、系统同步运行、潮流控制等带来的问题,大型的海上风电场更适合选用直流方式送电并网。直流送电又可分为自换相直流输电(LLC-HVDC)<sup>[2]</sup>和柔性直流输电(VSC-HVDC)<sup>[3]</sup>。基于电压源换流器的柔性直流输电方式具备有功和无功的独立控制、能向无源网络供电、控制灵活方便等等特点,很适合应用于海上风电等新能源的送电并网<sup>[4]</sup>。目前,对于柔性直流输电系统的研究重点集中在交流系统电压平衡的理想情况下的建模和控制策略等方面。在实际运行中,风电场通过柔性直流输电并网的交流系统电压并不能保持完全平衡,交流电网故障中不对称故障占绝大多数。当电网电压不平衡或交流系统发生不对称故障时,换流站的交直流两侧会产生大量的负序分量和非特征谐波,这些谐波分量威胁换流电力电子器件的安全<sup>[5]</sup>。同时,理想情况下设计的换流站控制系统在谐波的影响下将失去相位定向基准,并进一步影响控制系统的稳定性和准确性。因此,需要研究考虑电网交流系统发生不对称故障时的控制策略,满足整个输电系统运行时的安全要求。

交流电网压不平衡情况下,针对发生不对称故障的控制,主要是对故障电压电流进行正负序分离,对正

负序电流进行控制,抑制负序分量的影响<sup>[6]</sup>。文献[7]采用单电流环,通过前馈补偿系统的谐波。文献[8]以功率无波动为目标计算得到正、负序  $dq$  轴 4 个电流给定值,但正负序电流的控制均基于正序  $dq$  坐标轴得到,控制精度不高。文献[9]根据建立的正负序系统模型,提出一种精确反馈线性化理论的正负序电流非线性控制策略。文献[10-12]使用基于输出有功无波动的正、负序双电流环控制器,将结构对称的电流双闭环控制和瞬时功率理论相结合应用于 VSC 的有功功率平衡控制,有效抑制交流系统电压不平衡引起的有功功率和直流电压的波动,但都未考虑抑制负序电流的问题。本文针对海上风电场通过柔性直流输电并网方式下交流电网发生不对称故障时,对正负序进行单独控制。从抑制负序电流的目的出发,参考换流站前馈解耦控制方法,提出带电压反馈补偿的负序电流控制策略。

## 1 风电场 VSC-HVDC 并网控制分析

## 1.1 海上风电场接入系统结构

海上风电场通过两端柔性直流输电系统接入并网,风电场的各台机组通过风电场汇流母线汇流,再经过风电场侧的升压变压器升压,海上和陆上的换流站整流逆变后并网,其拓扑结构如图 1 所示。

作为能量转换中枢的换流站有海上整流站(VSC1)和岸上逆变站(VSC2)。换流站设备包括换流

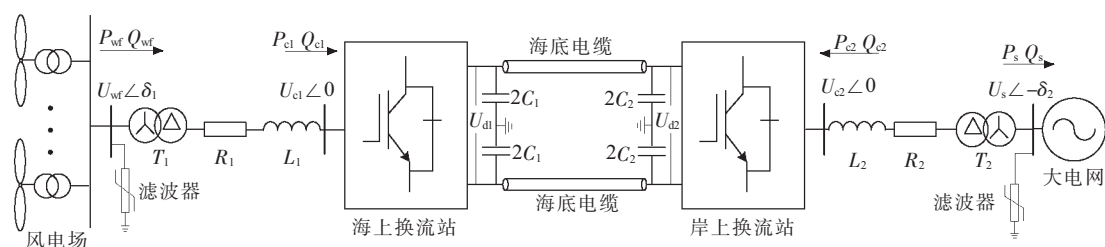


图 1 海上风电场柔性送电系统结构图

电抗器  $L$ 、等效电阻  $R$ 、直流稳压电容  $C$ 、高通滤波器以及升降压变压器等。

### 1.2 电压源换流器模型

在  $dq$  旋转坐标系下,建立电压源换流器的暂态和稳态数学模型。暂态模型:

$$\begin{cases} u_{cd} = -L \frac{di_d}{dt} + Ri_d + \omega Li_q + u_d \\ u_{cq} = -L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d + u_q \end{cases} \quad (1)$$

稳态模型:

$$\begin{cases} u_{cd} = Ri_d + \omega Li_q + u_d \\ u_{cq} = Ri_q + \omega Li_d + u_q \end{cases} \quad (2)$$

式(1,2)中: $u_{cd}, u_{cq}$  分别为换流器控制的  $d$  轴、 $q$  轴电压; $u_d, u_q$  为电网  $d$  轴、 $q$  轴电压; $i_d, i_q$  分别为变流器控制的  $d$  轴、 $q$  轴电压; $\omega$  为电网电压的角频率。

根据瞬时有功功率理论,换流器输送的有功、无功功率分别为:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2} (u_q i_d - u_d i_q) \end{cases} \quad (3)$$

根据能量守恒定理,交流侧与直流侧有功功率相等,则直流线路功率和电流分别为:

$$\begin{cases} P = u_{dc} i_{dc} \\ i_{dc} = \frac{3(u_d i_d + u_q i_q)}{2u_{dc}} \end{cases} \quad (4)$$

### 1.3 换流站控制策略

由于现在风电场主要应用双馈或者直驱风机,其控制相对成熟,频率等特性基本稳定。风电场侧换流器需要将整个风电场发出的功率整流后传递出去,不需要分别是有功还是无功,主要起到一个功率平衡节点的作用,只要稳定住风电场的交流电压,无需额外的频率控制或者功率控制环,本文对风电场换流器的控制借鉴柔性直流输电向无源网络输电控制策略,根据向无源网络供电控制策略,采用直接电压控制,参考换流器双闭环矢量控制系统,在直接电压控制的基础上加入了前馈补偿电压项,提高系统的动态响应速度、减小稳态误差,控制风电场汇流母线电压和频率稳定<sup>[13]</sup>。网侧换流站采用双闭环结构的电网电压矢量控制,基于控制直流线路上电压的稳定,维持两端换流站功率流动的平衡,外环采用定直流电压控制策略,同时控制向系统注入的无功,以便对电网进行无功补偿。

## 2 电网不对称故障负序电流控制策略

换流器的正常控制策略是双闭环控制,内环是电流控制。不对称控制策略参考这种控制方法,在电压电

流正负序分解后,在反向同步旋转坐标系下进行正负序独立的控制。进而抑制负序电流。

### 2.1 正负序分量检测

输电系统换流站都是通过  $\Delta$ - $Y_d$  接线的变压器连接到交流电网,换流站侧三角形接线,交流电网侧星形接地,当发生不对称故障时零序电流不能通过变压器,则不用考虑零序分量对换流器的影响,只需要考虑正负序分量即可,将三相电压或电流分解为正序分量和负序分量。在两相静止坐标( $\alpha\beta$ )系下三相电量可分解为:

$$f_{\alpha\beta}(t) = f_{\alpha\beta+} e^{j\omega t} + f_{\alpha\beta-} e^{-j\omega t} \quad (5)$$

将正、负序分量分别转换到正、负旋转坐标系,如图2所示,那么正负序分量在正负序旋转坐标系下均体现为直流。

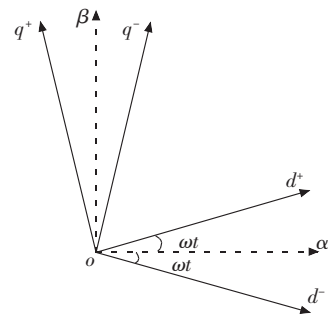


图2 坐标系与正负序旋转坐标系

目前,正负序分量检测有平均法和延时法2种。

(1)平均法也称滤波法,正序  $dq$  坐标系下正序分量为直流量,负序分量为两倍基波频率的交流分量;负序  $dq$  坐标系下负序分量为直流量,正序分量为两倍基波频率的交流分量;将三相量分别换算到正序  $dq$  轴上和负序  $dq$  轴上,分别用 100 Hz 带阻滤波器滤除二次量就得到正、负序  $dq$  轴分量。由于带阻滤波器的使用, $dq$  轴的电压电流共 8 个量都延时约半个周波。由于这些量都是直流量会在故障或者故障复归时有延时和相位滞后,会影响检测效果,降低正负序分离的精度。

(2)延时对称分量法即矢量法,利用电压或者电流的瞬时值以及上时刻瞬时值计算得到各相量的矢量,如图3所示。延时方法计算速度快,结构简单,本文采用这种方法。延时法是对称分量变换获得正序、负序分量,再分别  $dq$  变换得到所需要的正负序  $dq$  轴电压电流值。首先将三相信号经过克拉克变换,转移到两相静止坐标系下,再经过信号的延时和相位调整,得到一组新的信号,最后与原信号对消即可得到在两相静止坐标系下的正负序分量:

$$\begin{cases} u_{as} = u_{\alpha} \cdot e^{-T/4} \\ u_{\beta s} = u_{\beta} \cdot e^{-T/4} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_{\alpha p} = 0.5(u_{\alpha} - u_{\beta s}) \\ u_{\beta p} = 0.5(u_{\beta} - u_{\alpha s}) \\ u_{\alpha n} = 0.5(u_{\alpha} + u_{\beta s}) \\ u_{\beta n} = 0.5(u_{\beta} + u_{\alpha s}) \end{cases} \quad (7)$$

式(6,7)中: $u_{\alpha}, u_{\beta}$ 为三相电压经克拉克变换得到的两相静止坐标下的电压; $T$ 为交流电网时间周期; $u_{\alpha p}, u_{\beta p}$ 为正序分量; $u_{\alpha n}, u_{\beta n}$ 为负序分量,在经过 $dq$ 坐标变换即可得到在旋转坐标系下的正负序分量。

## 2.2 正序控制

在电网侧有不对称故障情况下,正序分量控制与稳态运行控制策略类似。电网电压参考方向取在 $d$ 轴上,得到 $d$ 轴电压等于电网矢量电压, $q$ 轴电压为0,即 $u_d = u_s, u_q = 0$ 。对直流电压和无功的控制可根据公式(3,4)推导正序的 $d$ 轴电流稳态值 $i_d^+$ 和 $q$ 轴电流稳态值 $i_q^+$ 的公式:

$$\begin{cases} i_d^+ = \frac{2u_{dref} i_{dc}}{3u_d} \\ i_q^+ = -\frac{2Q_{ref}}{3u_d} \end{cases} \quad (8)$$

得到正负的 $d$ 轴电流 $i_d^+$ 和 $q$ 轴电流 $i_q^+$ 后,再分别加上经过PI控制器的修正量 $\Delta i_d^+$ ,得到 $d$ 轴参考电流 $i_{dref}^+$ 和修正量 $\Delta i_q^+$ ,得到参考值 $i_{qref}^+$ 。

根据换流器暂态方程(1),经过外环得到的参考电流与测量的 $dq$ 轴电流比较后经过PI控制器得到电压一阶电压 $v_d^+, v_q^+$ (分别与电流 $i_{dref}^+, i_{qref}^+$ 具有一阶微分关系)。控制量 $u_{cd}^+, u_{cq}^+$ 除了分别受 $i_d^+, i_q^+$ 控制外,还会有交叉耦合项。因此,对此控制器引入了前馈补偿项 $\Delta u_d^+ = \omega L i_q^+, \Delta u_q^+ = \omega L i_d^+$ ,实现 $dq$ 轴的解耦控制,从而得到换流器正序 $dq$ 轴分量控制电压 $u_{cd}^+$ 和 $u_{cq}^+$ ,即:

$$\begin{cases} u_{cd}^+ = v_d^+ + \Delta u_d^+ \\ u_{cq}^+ = v_q^+ + \Delta u_q^+ \end{cases} \quad (9)$$

再经过坐标变换,进而得到两相静止坐标系下的 $\alpha\beta$ 轴分量 $u_{\alpha}^+$ 和 $u_{\beta}^+$ 。具体的控制框图如图3所示。

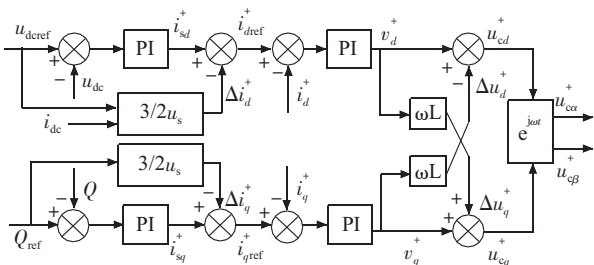


图3 正序电流控制控制器

## 2.3 负序控制

交流电网系统发生不对称故障时,产生的负序电流分量威胁着换流站的安全运行,不对称故障的控制策略也是抑制产生的负序电流。根据式(1)描述的换流站暂态模型,可以得到负序分量的暂态方程:

$$\begin{cases} \dot{u}_{cd}^- = -L \frac{di_d^-}{dt} + R i_d^- + \omega L i_q^- + u_d^- \\ \dot{u}_{cq}^- = -L \frac{di_q^-}{dt} + R i_q^- + \omega L i_d^- + u_q^- \end{cases} \quad (10)$$

进而得到负序控制器的表达式:

$$\begin{cases} u_{cd}^- = u_d^- (K_p + \frac{K_i}{s}) (i_{dref}^- - i_d^-) - \omega L i_q^- \\ u_{cq}^- = u_q^- (K_p + \frac{K_i}{s}) (i_{qref}^- - i_q^-) - \omega L i_d^- \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $i_{dref}^-, i_{qref}^-$ 分别为 $d$ 轴、 $q$ 轴上负序电流参考值。

根据式(11)得到负序电流控制器,最后得到的负序参考控制量再与正序控制量合成得到换流器的控制信号,控制策略如图4所示。

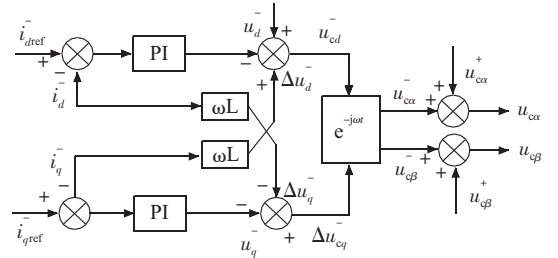


图4 负序电流控制控制器

为了抑制不对称故障引起的负序电流分量,通常是控制负序电流为0,即控制信号直接设置 $i_{dref}^- = i_{qref}^- = 0$ 。由图4可以看出,换流站的控制系统由相对独立的正序控制和负序控制组合而成,换流站的控制信号也是由正负序控制信号矢量叠加得到。因此,电网中发生不对称故障时,可以通过正负序分离后单独控制,抑制负序电流,保护换流器的安全。

## 3 仿真验证

基于以上建立的数学模型和提出的控制策略,用PSCAD/EMTDC仿真软件建立的海上风电场柔性直流输电系统仿真模型如图1所示。海上风电场有100台2 MW双馈风机组成,为了简化仿真模型,用一台额定电压13.8 kV、额定功率200 MW的双馈风机代替,经过13.8 kV/62.5 kV升压变压器与整流器相联,再经过100 km的海底电缆连接岸上换流站,换流器逆变后并入电网。柔性直流输电系统额定直流电压设定在 $\pm 60$  kV,换流电抗器 $L_1 = L_2 = 12$  mH,等效电感 $R_1 = R_2 = 0.2 \Omega$ ,直流侧电容 $2C_1 = 2C_2 = 2000 \mu\text{F}$ ,SVPWM触发频率设定在5 kHz。

### 3.1 正常情况下送电并网控制

为了验证在风电场出力变化情况下的系统控制情况,在0.5 s后系统稳定后,设置1 s时风电场并网运行,此时风速9 m/s,并在4 s时跃变到12 m/s,仿真结果如图5—7所示。

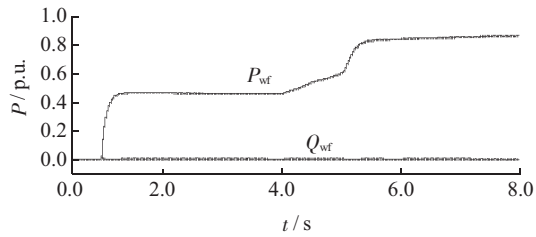


图5 等效风电场的输出功率

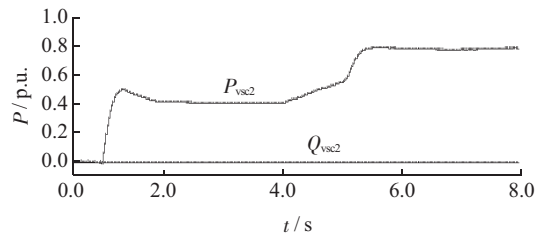


图6 通过换流站并入电网功率

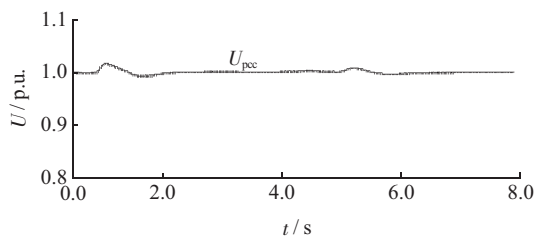


图7 风电场汇流母线电压

从图5—7可以看出,整个柔性直流输电系统能保证整个系统的电压的稳定和功率平衡,将海上风电场发出的功率输送到电网中。

### 3.2 电网不对称故障负序电流控制

在发生在电网的故障中,单相接地故障占到绝大多数。当交流侧电网在2 s时发生单相短路,持续时间0.1 s,仿真结果如图8—11所示。

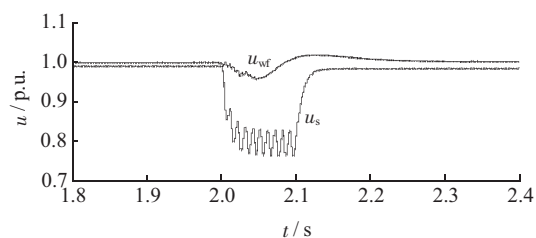


图8 风电场/交流电网交流电压

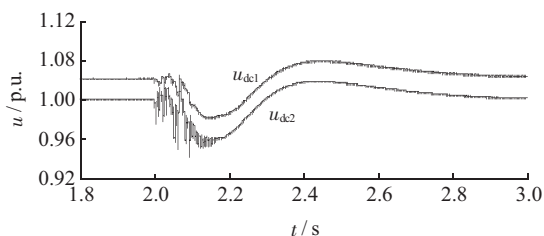


图9 直流线路两端直流电压

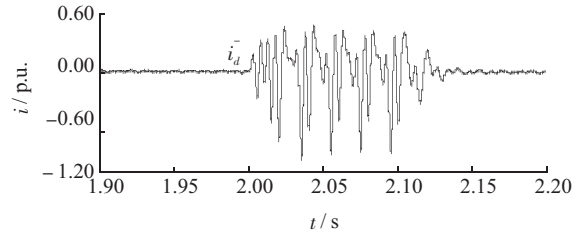


图10 单相故障负序电流d轴分量

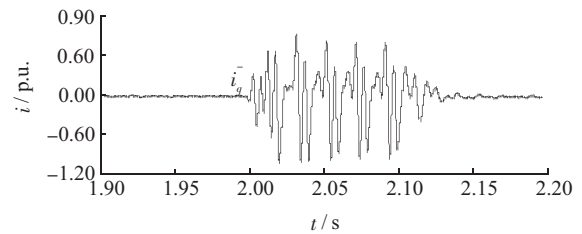


图11 单相故障负序电流q轴分量

图8—11中, $u_{wf}$ 为风电场母线电压, $u_s$ 为交流侧电网电压, $u_{dc1}$ 为风电场侧直流电压, $u_{dc2}$ 为岸上换流站侧电流电压。从图8—11可以看出,交流电网中发生单相短路时,对岸上换流站的影响较大,而海上风电场汇流母线电压由于直流线路电压波动发生轻微的波动,可见整个柔性直流输电系统对风电场起到保护的作用,海上风电机组可以正常运行。故障期间的电网侧出现了负序电流,对换流站危害较大。采用本文提出的负序电流控制策略,抑制负序电流,仿真结果如图12—16所示。

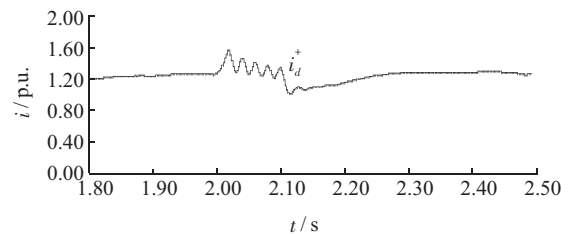


图12 正序电流d轴分量

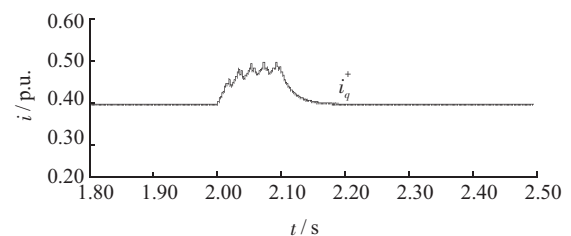


图13 正序电流q轴分量

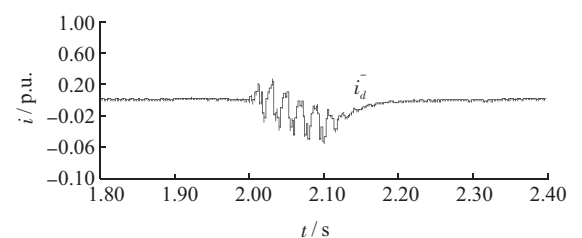


图14 负序电流d轴分量

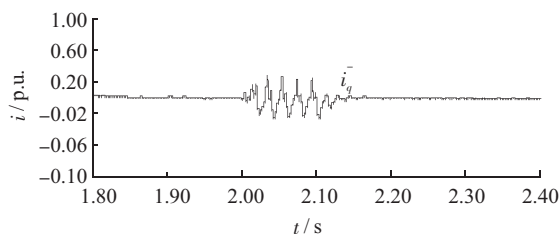
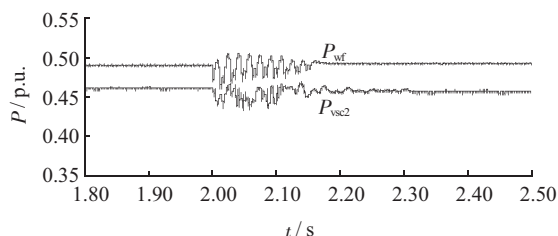
图 15 负序电流  $q$  轴分量

图 16 风电场发出与并入电网功率

从图 12—16 中可以看出,采用加入负序电流控制环的控制策略后,正序电流在短路故障期间有轻微的波动,负序电流故障期间控制在 0.02 p.u. 内波动,得到了很好地抑制,实现了控制负序电流控制目标。电网侧换流站功率波动也得到较好的平抑。

#### 4 结束语

本文对大型海上风电场通过柔性直流输电系统并网控制进行了分析研究。针对电网侧发生不对称故障,采用延时法对正负序分量进行分解,提出了负序电流控制策略,抑制不对称故障时产生的负序分量。结果表明:柔性直流输电系统能将风电场发出功率输送到电网中,保持功率的平衡。在电网故障期间能很好的隔离故障,本文所提负序电流控制策略能较好地抑制产生的负序分量。

#### 参考文献:

- [1] 张乐丰,王增平. 风电并网对电力系统的影响[J]. 江苏电机工程,2011,30(2):81-84.
- [2] MONTILLA-DJESUS M E, SANTOS-MARTIN D, AMALATES S, et al. Optimal Operation of Offshore Wind Farms with Line-

Commutated HVDC Link Connection [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 504-513.

- [3] 胡兆庆,毛承雄,陆继明,等. 一种新型的直流输电技术—HVDC Light [J]. 电工技术学报,2005,20(7):12-16.
- [4] 陈锋,刘连永,董余凡. 大规模海上风电场并网接入方式[J]. 江苏电机工程,2014,33(3):81-84.
- [5] 张兴,季建强,张崇魏,等. 基于内模控制的三相电压型 PWM 整流器不平衡控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(13):51-56.
- [6] 李响,韩民晓. 海上风电串联多端 VSC-HVDC 协调控制策略[J]. 电工技术学报,2013,28(5):42-48.
- [7] ENJETI P N, CHOUDHURY S A. A new Control Strategy to Improve the Performance of a PWM AC to DC Converter Under Unbalanced Operating Conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 04(8): 493-500.
- [8] RIOUAL P, POULIQUEN H, LOUIS J. Regulation of a PWM Rectifier in the Unbalanced Network State Using a Generalized Model [J]. IEEE Transactions on Power Electronics. 1996, 11(3): 495-502.
- [9] XU L, CARTWRIGHT P. Control of VSC Transmission Systems Under Unbalance Network Conditions [C]. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 (2): 626-632.
- [10] 皇甫成,贺之渊,杨广福,等. 交流电网不平衡情况下电压源换相直流输电系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2008,28(22):144-151.
- [11] 任亮,汤钰鹏,郑丹,等. 基于网侧功率平衡的电网不对称时三相 VSR 控制方法研究[J]. 自动化技术与应用,2007,26(11):86-87.
- [12] 刘菁,顾黎强. 交流系统故障时柔性直流系统的控制策略[J]. 华东电力,2012,40(1):136-140.
- [13] 石磊,李晨晨,田炜,等. 海上风电场柔性送电并网控制研究[J]. 华东电力,2014,42(4):674-679.

#### 作者简介:

张广明(1963),男,江苏丰县人,高级工程师,从事电力系统及其自动化、海上风力发电相关技术研究工作;

田炜(1978),男,湖北孝感人,高级工程师,从事海上风力发电控制、电机控制技术研究工作。

## Negative Current Control of VSC-HVDC for Offshore Wind Farm Under Grid Asymmetrical Fault

ZHANG Guangming, TIAN Wei

(NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Offshore wind farms are always connected to the power grid through VSC-HVDC. In this paper, the mathematical model and control strategy of VSC-HVDC system are studied. For an asymmetric fault, delay method is used to obtain the positive and negative sequence currents. Hence, with the sequence currents, a control strategy for damping negative current is proposed. Simulations have been implemented in PSCAD, and the results show that the proposed strategy is effective in damping negative current.

**Key words:** offshore wind farms; VSC-HVDC; asymmetrical fault; negative current