

基于负序电流补偿的并联风电变流器故障容错控制

吕伟^{1,2,3}, 王晗^{1,2,3}, 张建文^{1,2,3}, 陈根^{1,2,3}, Seiki Igarashi⁴, 蔡旭^{1,2,3}

(1. 上海交通大学 风力发电研究中心, 上海 200240;

2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院 电气工程系, 上海 200240;

3. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

4. 富士电机有限公司, 日本 东京 163-8001)

摘要:海上风电运行环境恶劣, 风电功率随机波动性大, 导致功率器件极易发生故障。故障容错控制是提高风电并联变流器运行可靠性以及功率可用度的有效手段。并联风电变流器某相发生开路故障后, 对并联风电变流器的故障运行机理进行了详细分析。在此基础上, 提出一种基于负序电流补偿的并网风电变流器故障容错控制, 利用非故障变流器模块对故障变流器模块进行负序电流补偿。当系统功率小于或等于0.5 p.u.时, 在保证并网侧电流平衡的条件下实现变流器最大输出功率; 当系统功率大于0.5 p.u.时, 首先满足系统有功输出要求, 然后对负序电流进行补偿。最后通过仿真验证了该控制理论的正确性与可行性。

关键词: 并联风电变流器; 故障容错控制; 负序电流补偿; 可靠性; 可用度

中图分类号: TM 614

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202106017

0 引言

目前海上风电机组的单机容量正朝着10 MW功率等级迈进。然而, 海上风电运行环境恶劣, 由于气候多变、交通不便等原因, 海上风电机组的维护可及性差, 维修成本高, 风电机组的高可靠性设计是海上风电机组亟待解决的关键核心问题^[1-3]。

海上风电变流器多采用多变流回路并联的结构来增加系统的冗余度, 以提高变流器运行的可靠性^[4-6]。国外西门子歌美飒以及国内阳光电源、禾望等风机变流器厂家所研制的风电变流器单机容量在6 MW及以上, 普遍采用并联的拓扑结构。根据风力发电系统故障及停机原因的统计与分析, 风电机组中电气系统和控制部分的故障率最高, 变流器作为电气系统的主要组成部分, 容易成为风力发电系统的薄弱环节^[7]。由于海上风电的间歇性、波动性, IGBT热应力剧烈变化, IGBT开路故障是较为常见的变流器故障类型之一^[8-9]。此外, 功率器件的短路故障, 可借助于串联快速熔断器, 根据快速熔断器的快速熔断特性^[10], 可以迅速将短路故障转化为开路故障^[11], 因此, 本文只针对变流器开路故障展开研究。

一般情况下, 功率器件发生故障后, 系统检测到故障则切除对应的变流器, 系统降功率运行; 当全部变流器发生故障后, 系统则被迫停机。为了提高系统的可用度、可靠性, 需在系统发生故障后采用容错控制。文献[12-13]采用冗余桥臂故障重构的方式, 当检测到某相桥臂发生故障后, 切除该相桥臂并投

入冗余桥臂, 系统可继续运行, 该方式简单可靠, 但需要配置额外的冗余桥臂, 提升了硬件成本。文献[14-15]采用虚拟桥臂的方式, 将故障桥臂连接到直流母线中点, 使得系统运行在三相四开关工况, 但采用该方法需要配置额外的双向开关。

相比增加硬件的故障容错控制, 采用软件优化的故障容错控制更受欢迎。文献[16-19]对多相电机缺相故障容错控制进行详细分析, 从铜耗最小、转矩最优、谐波最小等多个角度进行优化, 但该方法仅适用于多相电机, 对于三相电机并联系统并不适用。文献[20]采用电流指令重构的方式, 在不增加硬件成本的情况下, 极大提高了系统的可用度, 但未对发生故障时变流器的运行机理进行详细分析。

本文提出一种适用于并联变流器系统的故障容错控制, 针对桥臂开路故障详细分析变流器故障运行机理, 提出一种利用无故障变流器补偿故障变流器负序电流的故障容错控制。当系统功率小于或等于0.5 p.u.时, 在保证并网侧电流平衡的条件下实现变流器最大输出功率; 当系统功率大于0.5 p.u.时, 采用本文所提容错控制策略虽不可避免地产生了负序电流引起有功功率、无功功率脉动, 但提升了系统有功输出能力。最后, 搭建了相应的仿真平台, 仿真结果验证了根据理论分析所提出的控制策略的有效性。

1 桥臂开路故障后并联风电变流器运行机理

并联风电变流器采用两电平拓扑并联结构, 共直流母线, 其结构示意图见附录A图A1。

1.1 两电平拓扑电流路径分析

两电平拓扑有P、N这2种开关状态, 开关状态P表示开关 S_{x1} ($x=a, b, c$)所在桥臂开通, 开关 S_{x2} 所在

收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2021-04-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501303-01)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB1501303-01)

桥臂关断;开关状态N表示 S_{x2} 所在桥臂开通, S_{x1} 所在桥臂关断。根据电流方向和开关状态的不同,两电平拓扑共有4种电流路径,如图1所示。图中, i_x 为桥臂电流。

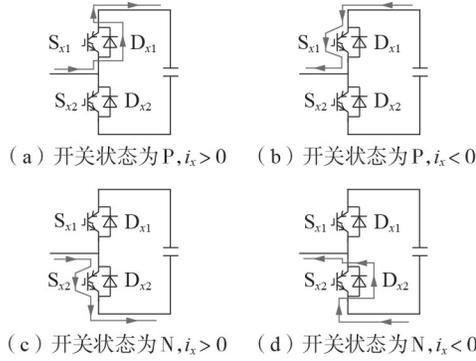


图1 两电平拓扑的电流路径与开关状态

Fig.1 Current paths and switching states of two-level topology

两电平拓扑的正向电流路径如图1(a)、(c)所示,负向电流路径如图1(b)、(d)所示。当 S_{x1} 所在桥臂发生开路故障时,图1(b)所示的电流路径将缺失;当 S_{x2} 所在桥臂发生开路故障时,图1(c)所示的电流路径将缺失。发生单相故障后,软件停止对该相功率器件发出驱动信号,二极管 D_{x1} 、 D_{x2} 短暂续流。当故障相电流达到过零点后,该相电流持续为0。

1.2 桥臂开路故障后变流器的数学模型

当变流器的一相桥臂发生开路故障时,若变流器继续运行,则其三相电压、电流不再平衡,变流器进入不对称运行工况。

根据对称分量法,可以将不对称三相电压、电流分解为正、负、零序分量。对于三相三线系统,可以不考虑零序分量,变流器的电压和电流相量分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{u} = \mathbf{u}^+ + \mathbf{u}^- = \mathbf{u}_{\alpha\beta}^+ + \mathbf{u}_{\alpha\beta}^- = \mathbf{u}_{dq}^+ e^{j\omega t} + \mathbf{u}_{dq}^- e^{-j\omega t} \\ \mathbf{i} = \mathbf{i}^+ + \mathbf{i}^- = \mathbf{i}_{\alpha\beta}^+ + \mathbf{i}_{\alpha\beta}^- = \mathbf{i}_{dq}^+ e^{j\omega t} + \mathbf{i}_{dq}^- e^{-j\omega t} \end{cases} \quad (1)$$

其中, \mathbf{u}^+ 、 \mathbf{u}^- 和 \mathbf{i}^+ 、 \mathbf{i}^- 分别为电压和电流相量的正、负序分量; $\mathbf{u}_{\alpha\beta}^+ = u_{\alpha}^+ + ju_{\beta}^+$ 、 $\mathbf{u}_{\alpha\beta}^- = u_{\alpha}^- + ju_{\beta}^-$ 和 $\mathbf{i}_{\alpha\beta}^+ = i_{\alpha}^+ + ji_{\beta}^+$ 、 $\mathbf{i}_{\alpha\beta}^- = i_{\alpha}^- + ji_{\beta}^-$ 分别为两相静止坐标系下变流器电压和电流相量的正、负序分量; $\mathbf{u}_{dq}^+ = u_d^+ + ju_q^+$ 、 $\mathbf{u}_{dq}^- = u_d^- + ju_q^-$ 和 $\mathbf{i}_{dq}^+ = i_d^+ + ji_q^+$ 、 $\mathbf{i}_{dq}^- = i_d^- + ji_q^-$ 分别为旋转坐标系下变流器电压和电流相量的正、负序分量, u_d^+ 、 u_d^- 和 u_q^+ 、 u_q^- 分别为旋转坐标系下 d 轴和 q 轴电压的正、负序分量, i_d^+ 、 i_d^- 和 i_q^+ 、 i_q^- 分别为旋转坐标系下 d 轴和 q 轴电流的正、负序分量; ω 为电网角频率; t 为时间。由于电网电压三相平衡,网侧变流器的并网功率与电流密切相关。在旋转坐标系中,电流相量可分解为逆时针旋转的正序分量和顺时针旋转的负序分量,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{i}^+ = \mathbf{i}_{dq}^+ e^{j\omega t} = (i_d^+ + ji_q^+) e^{j\omega t} \\ \mathbf{i}^- = \mathbf{i}_{dq}^- e^{-j\omega t} = (i_d^- + ji_q^-) e^{-j\omega t} \end{cases} \quad (2)$$

将负序电流相量变换到正序同步旋转坐标系下,可得:

$$\mathbf{i}^- = \{ [i_d^- \cos(2\omega t) - i_q^- \sin(-2\omega t)] + j [i_d^- \sin(-2\omega t) + i_q^- \cos(2\omega t)] \} e^{j\omega t} \quad (3)$$

根据式(3),负序电流相量在正序旋转坐标系下表现为2倍工频的脉动分量。在正序旋转坐标系基于比例积分调节器的传统控制下,负序电流将处于不控状态,需采取额外措施。将式(3)代入式(1)可得:

$$\mathbf{i} = \{ [i_d^+ + i_d^- \cos(2\omega t) - i_q^- \sin(-2\omega t)] + j [i_q^+ + i_d^- \sin(-2\omega t) + i_q^- \cos(2\omega t)] \} e^{j\omega t} \quad (4)$$

由式(4)可得,正序同步旋转坐标系下电流的 d 轴和 q 轴分量分别为:

$$\begin{cases} i_d = i_d^+ + i_d^- \cos(2\omega t) - i_q^- \sin(-2\omega t) \\ i_q = i_q^+ + i_d^- \sin(-2\omega t) + i_q^- \cos(2\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

不对称运行工况下网侧变流器输出的复功率为:

$$S = 1.5(e_{dq}^+ e^{j\omega t} + e_{dq}^- e^{-j\omega t}) (\mathbf{i}_{dq}^+ e^{j\omega t} + \mathbf{i}_{dq}^- e^{-j\omega t}) \quad (6)$$

其中, $e_{dq}^+ = e_d^+ + je_q^+$ 、 $e_{dq}^- = e_d^- + je_q^-$ 分别为两相旋转坐标系下电网电压的正、负序分量, e_d^+ 、 e_d^- 和 e_q^+ 、 e_q^- 分别为旋转坐标系下 d 轴和 q 轴电网电压的正、负序分量。

将式(2)、(3)代入式(6),网侧变流器的有功功率 P_g 和无功功率 Q_g 分别为:

$$\begin{cases} P_g = P_0 + P_1 \cos(2\omega t) + P_2 \sin(2\omega t) \\ Q_g = Q_0 + Q_1 \cos(2\omega t) + Q_2 \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_0 = 1.5(e_d^+ i_d^+ + e_q^+ i_q^+ + e_d^- i_d^- + e_q^- i_q^-) \\ P_1 = 1.5(e_d^+ i_d^- + e_q^+ i_q^- + e_d^- i_d^+ + e_q^- i_q^+) \\ P_2 = 1.5(e_d^+ i_q^- - e_q^+ i_d^- - e_d^- i_q^+ + e_q^- i_d^+) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Q_0 = 1.5(-e_d^+ i_q^+ + e_q^+ i_d^+ - e_d^- i_q^- + e_q^- i_d^-) \\ Q_1 = 1.5(-e_d^+ i_q^- + e_q^+ i_d^- - e_d^- i_q^+ + e_q^- i_d^+) \\ Q_2 = 1.5(e_d^+ i_d^- + e_q^+ i_q^- - e_d^- i_d^+ - e_q^- i_q^+) \end{cases} \quad (9)$$

其中, P_0 、 Q_0 分别为有功功率、无功功率平均值; P_1 、 P_2 和 Q_1 、 Q_2 分别为有功功率和无功功率2倍频脉动的余弦分量、正弦分量的峰值。

由于电网电压三相平衡, $e_d^- = e_q^- = 0$ 。采用电网电压定向控制时, q 轴电压为0,即 $e_q^+ = 0$ 。不对称运行工况下网侧变流器的有功功率、无功功率分别为:

$$\begin{cases} P_g = 1.5 [e_d^+ i_d^+ + e_d^- i_d^- \cos(2\omega t) + e_d^+ i_q^- \sin(2\omega t)] \\ Q_g = 1.5 [-e_d^+ i_q^- - e_d^- i_q^- \cos(2\omega t) + e_d^+ i_d^- \sin(2\omega t)] \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10),不对称运行工况下 P_g 、 Q_g 主要取决于并网正、负序电流的 d 、 q 轴分量。

2 并联风电变流器的容错控制

2.1 并联风电变流器的故障容错运行特性和负序电流补偿机制

本文提出的容错控制仅适用于单相桥臂开路故障,对于两相及两相以上的故障需切除故障变

流器。以2台变流器并联系统为例,2台变流器并联系统如附录A图A2所示。设变流器VSC₁的S_{a1}发生开路故障,变流器VSC₂正常。VSC₁的a相桥臂发生开路故障后,二极管短暂续流,之后电流变为0,b、c相桥臂继续工作。设 γ 为相电流的初始相角,则VSC₁的三相电流分别为 $i_{a1}=0, i_{b1}=I_1 \cos(\omega t + \gamma), i_{c1}=-i_{b1}, I_1$ 为VSC₁三相电流幅值。通过派克变换,VSC₁三相电流的 d 、 q 轴分量分别为:

$$\begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abcdq} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_1}{\sqrt{3}} [\sin(2\omega t + \gamma) - \sin \gamma] \\ \frac{I_1}{\sqrt{3}} [\cos(2\omega t + \gamma) + \cos \gamma] \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{T}_{abcdq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, θ 为a相坐标轴与 d 轴之间的夹角。由式(11)可知,VSC₁的 d 轴电流含有2倍频分量,将导致VSC₁的有功功率中包含2倍频脉动分量。为了使VSC₁的容错运行功率最大, d 轴电流的直流分量 $-I_1 \sin \gamma / \sqrt{3}$ 应最大,则 $\gamma = -\pi/2$ 。因此式(11)可以简化为:

$$\begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 [1 - \cos(2\omega t)] / \sqrt{3} \\ I_1 \sin(2\omega t) / \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

对比式(13)、(5)可得VSC₁ d 、 q 轴电流的正、负序分量分别为:

$$\begin{cases} i_{d1}^+ = I_1 / \sqrt{3} \\ i_{q1}^+ = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} i_{d1}^- = -I_1 / \sqrt{3} \\ i_{q1}^- = 0 \end{cases} \quad (15)$$

根据式(14)、(15),变流器发生单相开路故障后,变流器的有功功率中会产生2次脉动,需要对其进行抑制。对于多变流器并联系统,故障变流器容错运行产生的负序电流可通过非故障变流器产生相反的负序电流补偿,使并联系统的总负序电流为0。

为了补偿VSC₁的 d 轴电流中的负序分量,VSC₂电流的 d 、 q 轴分量分别为:

$$\begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_2 + I_1 \cos(2\omega t) / \sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, I_2 为VSC₂三相电流幅值。对比式(16)、(5)可得VSC₂ d 、 q 轴电流的正、负序分量分别为:

$$\begin{cases} i_{d2}^+ = I_2 \\ i_{q2}^+ = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} i_{d2}^- = I_1 / \sqrt{3} \\ i_{q2}^- = 0 \end{cases} \quad (18)$$

此时并联变流器系统的总 d 轴电流正、负序分量分别为:

$$\begin{cases} i_d^+ = i_{d1}^+ + i_{d2}^+ = I_1 / \sqrt{3} + I_2 \\ i_d^- = i_{d1}^- + i_{d2}^- = 0 \end{cases} \quad (19)$$

根据式(19),通过非故障变流器的负序电流补偿可有效消除并网有功功率的2倍频功率脉动。

因此,对于多变流器并联系统,只要非故障变流器能够对故障变流器产生的负序电流进行完全补偿,就可以实现故障后总的三相电流平衡。但是,随着并联变流器系统运行功率的增加,非故障变流器不一定能够完全补偿故障变流器的负序电流,此时并网总电流中不可避免地存在一定的负序分量,并网有功功率将会产生2倍频脉动。

2.2 容错控制的模式及其功率约束条件

以网侧变流器为例,其控制目标为维持直流侧电压稳定并保持并网变流器三相功率平衡。根据并联系统负序电流的补偿程度,网侧变流器并联系统的优化容错控制模式可以分为如下2种。

1) 负序电流全补偿,并网三相电流平衡。实现并网变流器的三相功率平衡,消除直流母线的电压脉动,消除了2倍频的功率脉动。

2) 负序电流欠补偿,并网有功功率存在脉动。随着并联系统负载功率的增加,并联系统的非故障变流器无法完全补偿故障变流器产生的负序电流,并网三相功率将不再平衡,直流母线电压会出现2倍频脉动。

由2.1节的分析可知,不对称运行工况下,两相静止坐标系下变流器电流的正、负序分量分别为:

$$\begin{cases} i_\alpha^+ = i_d^+ \cos(\omega t) - i_q^+ \sin(\omega t) \\ i_\beta^+ = i_d^+ \sin(\omega t) + i_q^+ \cos(\omega t) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} i_\alpha^- = i_d^- \cos(\omega t) - i_q^- \sin(-\omega t) \\ i_\beta^- = i_d^- \sin(-\omega t) + i_q^- \cos(\omega t) \end{cases} \quad (21)$$

采用控制模式1)时,负序电流全补偿,并联系统的总负序电流为0,系统的三相电流平衡,当功率分别为0.2、0.35、0.5 p.u.时,系统三相电流矢量轨迹见附录A图A3(a)。由图可知,控制模式1)下并联系统的总电流相量只含有正序分量,负序分量为0。

由于非故障变流器需要补偿故障变流器产生的负序电流,非故障变流器的三相电流将不平衡,当最大相电流达到桥臂电流的额定值时,控制模式1)达到其功率极限,进一步增大运行功率,非故障变流器电流较小的相电流将继续增大,此时非故障变流器就无法完全补偿故障变流器产生的负序电流,并联系统进入控制模式2),故障变流器产生的负序电流欠补偿,并联系统的总负序电流不为0,当功率为0.55、0.65、0.75 p.u.时,三相电流不平衡,系统三相电流矢量由圆形变为椭圆,如图A3(b)所示。由图可知,控制模式2)下,并联系统的总电流相量同时含有正、负序分量。当非故障变流器的三相电流均

达到额定值时,控制模式 2) 达到其功率极限,并联系统达到最大容错运行功率。

并联变流器容错控制的功率约束条件为:

$$\begin{cases} i_{d1}^+ - i_{d1}^- \leq I_{\text{lim}} \\ i_{d2}^+ + i_{d2}^- \leq I_{\text{lim}} \end{cases} \quad (22)$$

其中, I_{lim} 为单个变流器桥臂电流的极限值。

对于故障 VSC₁, 由式(14)、(15)可知:

$$i_{d1}^+ = -i_{d1}^- \leq 0.5I_{\text{lim}} \quad (23)$$

采用控制模式 1) 时, 非故障 VSC₂ 可以完全补偿故障 VSC₁ 产生的负序电流分量。因此, 对于非故障 VSC₂ 存在如下关系:

$$\begin{cases} i_{d2}^- = -i_{d1}^- \\ i_{d2}^+ + i_{d2}^- \leq I_{\text{lim}} \end{cases} \quad (24)$$

此时并联系统的总 d 轴电流为:

$$i_d = i_{d1}^+ + i_{d2}^+ = -i_{d1}^- + i_{d2}^+ = i_{d2}^- + i_{d2}^+ \leq I_{\text{lim}} \quad (25)$$

定义系统容错功率比 A 为故障下有功功率与故障前最大输出有功功率之比。则控制模式 1) 下, 并联系统的容错功率比 A_1 为:

$$A_1 = \frac{i_d}{2I_{\text{lim}}} = \frac{i_{d1}^+ + i_{d2}^+}{2I_{\text{lim}}} \leq 50\% \quad (26)$$

当并联系统的功率负载量大于 50% 的额定容量时, 根据控制模式 2), 非故障 VSC₂ 不能完全补偿故障 VSC₁ 产生的负序电流分量, 并联系统将输出负序电流, 并网有功功率中将存在 2 倍频脉动分量。因此, 对于非故障 VSC₂ 存在如下关系:

$$\begin{cases} 0 \leq i_{d2}^- \leq -i_{d1}^- \\ i_{d2}^+ + i_{d2}^- \leq I_{\text{lim}} \end{cases} \quad (27)$$

控制模式 2) 下, 当 $i_{d2}^- = 0.5I_{\text{lim}}$ 时, 并联系统的最小容错功率比 $A_{2\text{min}}$ 为:

$$A_{2\text{min}} = \frac{i_d}{2I_{\text{lim}}} = \frac{i_{d1}^+ + i_{d2}^+}{2I_{\text{lim}}} = \frac{0.5I_{\text{lim}} + 0.5I_{\text{lim}}}{2I_{\text{lim}}} = 50\% \quad (28)$$

当 $i_{d2}^- = 0$ 时, 并联系统的最大容错功率比 $A_{2\text{max}}$ 为:

$$A_{2\text{max}} = \frac{i_d}{2I_{\text{lim}}} = \frac{i_{d1}^+ + i_{d2}^+}{2I_{\text{lim}}} = \frac{0.5I_{\text{lim}} + I_{\text{lim}}}{2I_{\text{lim}}} = 75\% \quad (29)$$

综上, 当单台变流器的一相桥臂发生故障切除之后, 并联系统的最大容错功率为变流器额定容量的 75% (0.75 p.u.), 大于传统容错控制的容错功率 (0.5 p.u.), 提高了双变流器并联系统的可用容量。

2.3 变流器电流指令优化

基于 2.2 节分析可知, 不同控制模式下变流器的功率约束不同, 因此首先需要确定变流器的控制模式。定义 M 为变流器控制模式的控制字, 则:

$$M = \begin{cases} 0 & 0 < i_d^* \leq 0.5 \text{ p.u.} \\ 1 & 0.5 \text{ p.u.} < i_d^* \leq 0.75 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (30)$$

其中, i_d^* 为 d 轴电流总指令值, 由于网侧变流器的并网功率与电流密切相关, 其表示有功功率标么值。

当 $M=0$ 时, 并联系统采用控制模式 1); 当 $M=1$

时, 并联系统采用控制模式 2)。容错控制的模式选择如附录 A 图 A4 所示。

不同的控制模式下, 并联系统各变流器的电流给定指令不同。控制模式 1) 下, 并联系统 VSC₁、VSC₂ 的 d 轴电流指令值为:

$$\begin{cases} i_{d1}^{*+} = 0.5i_d^* \\ i_{d1}^{*-} = -0.5i_d^* \\ i_{d2}^{*+} = i_d^* - i_{d1}^{*+} \\ i_{d2}^{*-} = -i_{d1}^{*-} \end{cases} \quad (31)$$

其中, i_{dj}^{*+} ($j=1, 2$)、 i_{dj}^{*-} 分别为 VSC _{j} d 轴电流正、负序分量的指令值。控制模式 2) 下, 并联系统 VSC₁、VSC₂ 的 d 轴电流指令值为:

$$\begin{cases} i_{d1}^{*+} = 0.5i_{\text{lim}} \\ i_{d1}^{*-} = -0.5i_{\text{lim}} \\ i_{d2}^{*+} = i_d^* - i_{d1}^{*+} \\ i_{d2}^{*-} = i_{\text{lim}} - i_{d2}^{*+} \end{cases} \quad (32)$$

其中, i_{lim} 为桥臂电流的最大值。

图 2 为不同控制模式下并联变流器的电流指令及其功率极限示意图。图中, 电流、总功率均为标么值, 0.5 p.u. 及 0.75 p.u. 分别为控制模式 1)、2) 的并网变流器的功率极限值。由图可知, 当系统总功率小于或等于 0.5 p.u. 时, 故障 VSC₁ 产生的负序电流 i_{d1}^- 完全由非故障 VSC₂ 产生的负序电流 i_{d2}^- 进行补偿, 故整个并联系统不存在负序电流。当系统功率超过 0.5 p.u. 时, 故障 VSC₁ 达到最大运行功率 0.5 p.u. 并保持该功率运行, 系统总功率超过 50% 额定容量的部分功率必须由非故障 VSC₂ 提供, 因此 VSC₂ 的负序补偿电流 i_{d2}^- 开始逐渐降低, 补偿故障 VSC₁ 的负序电流随之减少, 整个并联系统的负序电流开始增大。当并联系统功率大于 0.5 p.u. 时采用控制模式 2), 负序电流欠补偿, 实际上以增加系统负序电流分量为代价来提升整个系统的功率, 并且在 0.5 p.u. 的基础上提升功率越多, 负序分量越大。最大功率 (0.75 p.u.) 是理论上的最大故障运行功率, 这一临界点的物理含义是非故障变流器完全不产生负序补偿

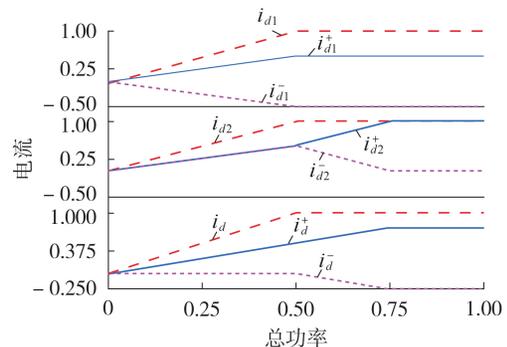


图 2 不同控制模式下并联变流器的功率极限
Fig.2 Power limits of parallel converters under different control modes

电流,故障变流器和非故障变流器均以其最大有功功率进行输出,系统输出有功功率、无功功率存在2倍频脉动。因此,负序电流补偿容错控制的目的在于:发生故障后并联系统功率小于或等于0.5 p.u.时,并联系统可继续稳定运行;并联系统功率大于0.75 p.u.时则可通过负序电流补偿的方式,最大限度减少系统负序分量,降低输出有功和无功的脉动。

2.4 桥臂开路故障容错控制

以2台变流器并联的网侧变流器为例说明桥臂开路故障容错控制。所提出的提高并联变流器系统可用度的故障容错控制如附录A图A5所示,电压外环的比例积分调节器输出 d 轴电流,根据并联系统的功率载荷率,选择相应的控制模式,根据并联系统的控制模式,得到并联系统各个变流器的 d 轴电流正、负序分量的给定值,通过坐标变换,得到三相静止坐标系下各个变流器的各相电流参考指令,比例积分调节器在同步旋转坐标系下,只能实现直流信号的稳态无差控制。通过基于比例谐振调节器^[21-22]的电流内环得到调制指令,调制方式采用正弦脉宽调制。虽然机侧、网侧变流器的控制结构有所差异,但其桥臂开路故障容错控制具有相似性,均体现在对并联系统各变流器电流内环参考指令的优化,故而机侧变流器的故障容错机制不再赘述。

在本节提出的桥臂开路故障容错控制下,并联系统的最大容错功率可达0.75 p.u.,提高了并联系统的可用度,可提高风电机组的发电量。该优化容错控制基于软件层面的优化,不增加硬件设计成本;基于控制策略层面的优化,同样适用于并联型三电平变流器的容错控制。

3 仿真验证

为了验证所提出的桥臂开路故障容错控制的有效性,在MATLAB/PLECS中搭建仿真系统,系统结构见附录A图A1,3 MW/4 MV·A变流器由2台2 MV·A的变流器并联而成,单台变流器的参数见附录A表A1。

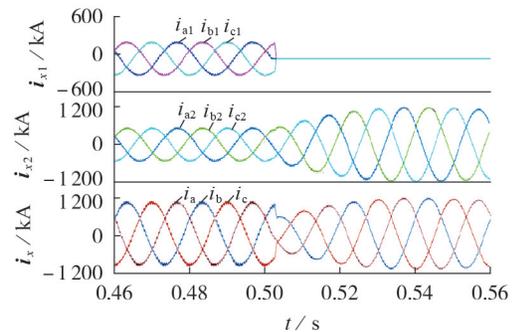
仿真验证中,并联变流器系统的3种运行模式分别定义如下:①正常模式为所有并联变流器均非故障,系统正常运行;②传统容错模式为故障变流器完全切除,仅非故障变流器继续工作,系统降功率运行;③优化容错模式为仅故障桥臂被切除,非故障桥臂继续运行,系统故障后以最大容错功率运行。

为验证所提出的容错控制策略的有效性,进行了2种工况的仿真:①变流器的运行功率为1 MW(0.33 p.u.);②变流器的运行功率为2 MW(0.66 p.u.),这2种工况分别对应控制模式1)和控制模式2)。

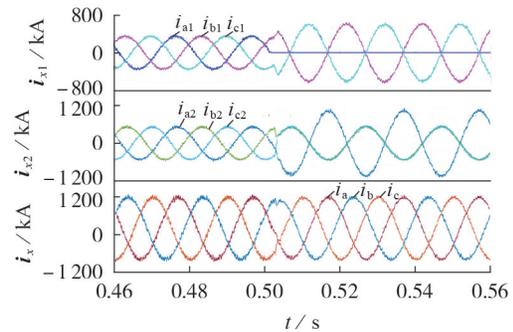
3.1 工况①下仿真分析

以VSC₁的S_{a1}所在桥臂开路故障为例分析所提开路故障优化容错控制。仿真中,变流器分别运行

在正常模式和容错模式:[0,0.5) s期间处于正常模式;[0.5,0.6] s期间处于容错模式。图3(a)、(b)分别给出了工况①下采用传统容错控制和优化容错控制时VSC₁、VSC₂和并联系统的三相电流波形。



(a) 传统容错控制



(b) 优化容错控制

图3 工况①下S_{a1}所在桥臂开路故障各变流器的三相电流
Fig.3 Three-phase current of each converter under Working Condition ① after S_{a1} arm bridge open-circuit fault

由图3可见,0.5 s时S_{a1}所在桥臂发生开路故障。采用传统容错控制策略时,VSC₁故障后整体切除,VSC₂工作。故障后VSC₁的三相电流为0,VSC₂的三相电流为故障前的2倍。采用优化容错控制策略时,仅VSC₁的a相桥臂被切除,b、c相桥臂继续工作,VSC₂正常工作。VSC₁的b、c相桥臂故障后相电流大小相等、方向相反,VSC₁容错运行造成的负序电流由VSC₂完全补偿,因此VSC₂的三相电流并不对称,但是并联系统的三相总电流保持平衡。

图3中变流器的运行功率仅为1 MW(0.33 p.u.),低于并联系统额定功率的50%,故非故障相变流器可完全补偿故障变流器的负序电流,故障后并联系统的三相总电流可保持不变,系统无需降功率运行。当变流器的运行功率超过并联系统额定功率的50%时,非故障相变流器不能完全补偿故障变流器产生的负序电流,并联系统三相总电流将不再平衡。

3.2 工况②下仿真分析

附录A图A6为工况②下采用优化容错控制时S_{a1}所在支路开路故障下VSC₁、VSC₂和并联系统的三相电流波形。设0.5 s时发生开路故障。由图可见,

采用优化容错控制时,仅VSC₁的a相桥臂被切除,b、c相桥臂继续工作,VSC₂正常工作,故障后VSC₁的b、c相桥臂相电流大小相等、方向相反。由于VSC₂不能完全补偿VSC₁容错运行产生的负序电流,VSC₂的三相电流不对称,并联系统的三相总电流也不平衡。

将2种工况的并网有功功率进行对比,图4上图和下图分别给出了工况①、②下采用优化容错控制时S_{a1}所在支路开路故障下并联系统的并网功率波形。由图4可知,工况①下,并网功率稳定;工况②下,并联系统有功功率中存在2倍频脉动分量。工况②虽然提高了系统的容错容量,但是不可避免地产生2倍频功率脉动。

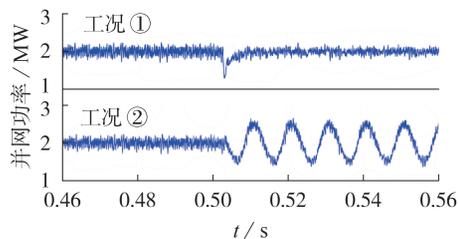


图4 不同控制模式下并联变流器的功率波形

Fig.4 Power waveforms of parallel converters under different control modes

优化容错控制策略在并联变流器系统发生开路故障时,仅切除故障桥臂,故障变流器不对称运行,可以提高并联系统的可用度,增加发电量,提高风电机组的经济效益。

4 结论

本文针对并联型风电变流器单相桥臂开路故障展开理论分析,揭示了并联变流器故障运行的机理,提出一种基于负序电流补偿的故障容错控制策略。桥臂开路故障容错控制策略下,并联系统的最大可用度为0.75 p.u.,系统需要降额运行。仿真结果验证了提出的容错控制策略的有效性和可行性。在海上风机运维不可及的情况下,通过提出的容错控制策略可提升系统的可用度,有效提升经济效益。

致 谢

本文受到富士电机有限公司委托研究项目的大力资助,特此表示感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 黄玲玲,曹家麟,张开华,等. 海上风电机组运行维护现状研究与展望[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):729-738.
HUANG Lingling, CAO Jialin, ZHANG Kaihua, et al. Status and prospects on operation and maintenance of offshore wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 729-738.

[2] POLINDER H, FERREIRA J A, JENSEN B B, et al. Trends in wind turbine generator systems[J]. IEEE Journal of Emer-

ging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(3): 174-185.

- [3] 蔡旭,陈根,周党生,等. 海上风电变流器研究现状与展望[J]. 全球能源互联网,2019,2(2):102-115.
CAI Xu, CHEN Gen, ZHOU Dangsheng, et al. Review and prospect on key technologies for offshore wind power converters [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 102-115.
- [4] 张健文,王鹏,王晗,等. 多逆变器并联的均流控制策略[J]. 电工技术学报,2015,30(18):61-68.
ZHANG Jianwen, WANG Peng, WANG Han, et al. Average-current control strategy of multiple parallel inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 61-68.
- [5] CHEN G, CAI X. Adaptive control strategy for improving the efficiency and reliability of parallel wind power converters by optimizing power allocation[J]. IEEE Access, 2018, 6: 6138-6148.
- [6] 张健文. 高可用度长寿命并联型风电变流器研究[D]. 上海: 上海交通大学,2014.
ZHANG Jianwen. Research on high availability long lifetime parallel converter for wind power application[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [7] WANG H, MA K, BLAABJERG F. Design for reliability of power electronic systems[C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012: 33-44.
- [8] 韩丽,罗朋,汤家升,等. 基于H桥变流器的IGBT开路故障诊断[J]. 电工技术学报,2016,31(16):163-171.
HAN Li, LUO Peng, TANG Jiasheng, et al. Fault diagnosis research based on the H bridge inverter IGBT open circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 163-171.
- [9] 杨晓冬,王崇林,史丽萍. H桥逆变器IGBT开路故障诊断方法研究[J]. 电机与控制学报,2014,18(5):112-118.
YANG Xiaodong, WANG Chonglin, SHI Liping. Study of IGBT open-circuit fault diagnosis method for H-bridge inverter [J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(5): 112-118.
- [10] JAMSHIDPOUR E, POURE P, GHOLIPOUR E, et al. Single-switch DC-DC converter with fault-tolerant capability under open- and short-circuit switch failures[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2703-2712.
- [11] 杭俊,张建忠,程明,等. 基于线电压误差的永磁直驱风电系统变流器开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2017,37(10): 2933-2943.
HANG Jun, ZHANG Jianzhong, CHENG Ming, et al. Fault diagnosis of open-circuit faults in converters of direct-driven permanent magnet wind power generation systems based on line voltage errors[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2933-2943.
- [12] 徐殿国,刘晓峰,于泳. 变频器故障诊断及容错控制研究综述[J]. 电工技术学报,2015,30(21):1-12.
XU Dianguo, LIU Xiaofeng, YU Yong. A survey on fault diagnosis and tolerant control of inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 1-12.
- [13] ZHANG W P, XU D H, ENJETI P N, et al. Survey on fault-tolerant techniques for power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6319-6331.
- [14] NAIDU M, GOPALAKRISHNAN S, NEHL T W. Fault-tolerant permanent magnet motor drive topologies for automotive X-by-wire systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(2): 841-848.
- [15] 年珩,周义杰,曾恒力. 开绕组永磁同步发电机的容错控制

- [J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 58-67.
NIAN Heng, ZHOU Yijie, ZENG Hengli. Fault-tolerant control technique of permanent magnet synchronous generator based on open winding configuration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 58-67.
- [16] 王海兵, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 一相开路时双三相永磁同步电机简化容错控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 74-79.
WANG Haibing, ZHAO Rongxiang, TANG Shengqing, et al. Simple fault tolerant control of dual three-phase PMSM under one phase open-circuited condition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 74-79.
- [17] 周长攀, 杨贵杰, 苏健勇, 等. 基于正常解耦变换的双三相永磁同步电机缺相容错控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 86-96.
ZHOU Changpan, YANG Guijie, SU Jianyong, et al. The control strategy for dual three-phase PMSM based on normal decoupling transformation under fault condition due to open phases[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 86-96.
- [18] 白洪芬, 朱景伟, 孙军浩, 等. 双绕组永磁容错电机不同故障容错控制策略的比较研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 189-199.
BAI Hongfen, ZHU Jingwei, SUN Junhao, et al. Comparative study of different fault tolerant control strategies for dual-winding fault tolerant permanent magnet motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 189-199.
- [19] 刘海涛, 易新强, 王东, 等. 五相感应电机缺相容错运行的全转矩范围效率优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1642-1652.
LIU Haitao, YI Xinqiang, WANG Dong, et al. An efficiency-optimized control strategy in the full torque operation range for five-phase induction motor under open-circuited fault conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1642-1652.
- [20] 陈根, 蔡旭. 并联型风电变流器故障重构控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4339-4349, 4634.
CHEN Gen, CAI Xu. Fault reconfigurable control for parallel wind power converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4339-4349, 4634.
- [21] 韩刚, 蔡旭. 不平衡及畸变电网下并网变流器的比例多谐振电流控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 104-112, 119.
HAN Gang, CAI Xu. Proportional multi-resonance current control of grid-connected converter under unbalanced and distorted grid condition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 104-112, 119.
- [22] 凌禹, 窦真兰. 基于DVR的双馈风电机组不对称电压故障穿越[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 65-70, 77.
LING Yu, DOU Zhenlan. Asymmetrical voltage fault ride-through of wind turbine with DFIG using DVR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 65-70, 77.

作者简介:



吕伟

吕伟(1995—),男,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为大功率电力电子与电力系统稳定与控制等(E-mail: lvwei0815@sjtu.edu.cn);

王晗(1982—),男,河南内乡人,助理研究员,博士,主要研究方向为大功率电力电子与电力系统稳定与控制等(E-mail: wanghansjtu@sjtu.edu.cn);

张建文(1981—),男,浙江开化人,助理研究员,博士,研究方向为可再生能源并网技术、大功率电力电子与电力系统控制等(E-mail: icebergzjw@sjtu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Fault-tolerant control based on negative-sequence current compensation for parallel wind power converters

LÜ Wei^{1,2,3}, WANG Han^{1,2,3}, ZHANG Jianwen^{1,2,3}, CHEN Gen^{1,2,3}, Seiki Igarashi⁴, CAI Xu^{1,2,3}

(1. Wind Power Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Electrical Engineering, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

4. Fuji Electric Co., Ltd., Tokyo 163-8001, Japan)

Abstract: The operating environment of offshore wind power is harsh, and the random fluctuation of wind power is large, which leads the power devices easily to fail. Fault-tolerant control is an effective means to improve the reliability and availability of parallel wind power converters. The fault operation mechanism of a parallel wind power converter in detail is analyzed after open circuit fault occurs in a phase of parallel wind power converter. On this basis, a fault-tolerant control based on negative-sequence current compensation for parallel wind power converters is proposed, and a non-faulty converter module is used to compensate the negative-sequence current of the faulty converter module. When the system power is less than or equal to 0.5 p.u., the maximum output power of the converter is realized under the condition of ensuring the current balance at the grid-connected side; when the system power is greater than 0.5 p.u., the negative-sequence current is compensated when the maximum output power is satisfied of the first importance. Finally, the correctness and feasibility of the control theory are verified by simulation.

Key words: parallel wind power converters; fault-tolerant control; negative-sequence current compensation; reliability; availability

附录 A

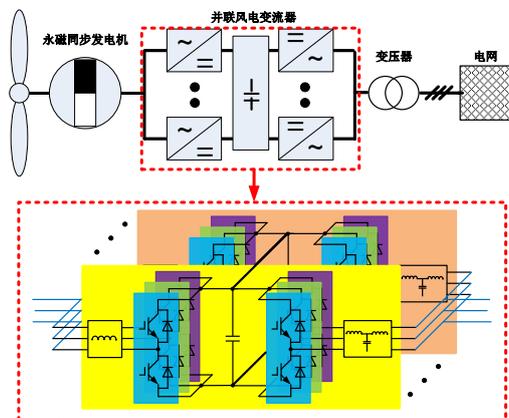


图 A1 并联型风电变流器结构示意图

Fig.A1 Schematic diagram of configuration among parallel wind power converters

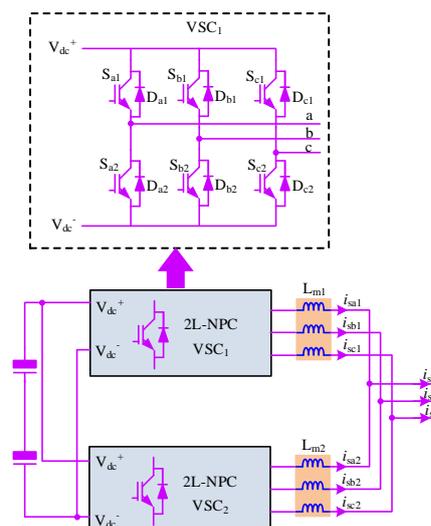
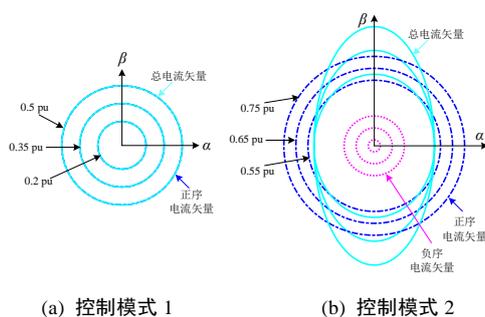


图 A2 2 台变流器并联系统

Fig.A2 Parallel system with two converters



(a) 控制模式 1

(b) 控制模式 2

图 A3 不同控制模式下并联变流器系统的电流相量图

Fig.A3 Current vector diagram of parallel converter system under different control modes

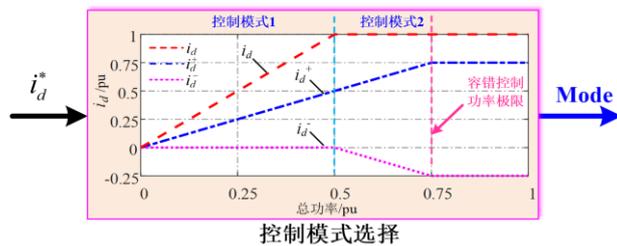


图 A4 容错控制的模式选择

Fig.A4 Modes selection of fault tolerant control

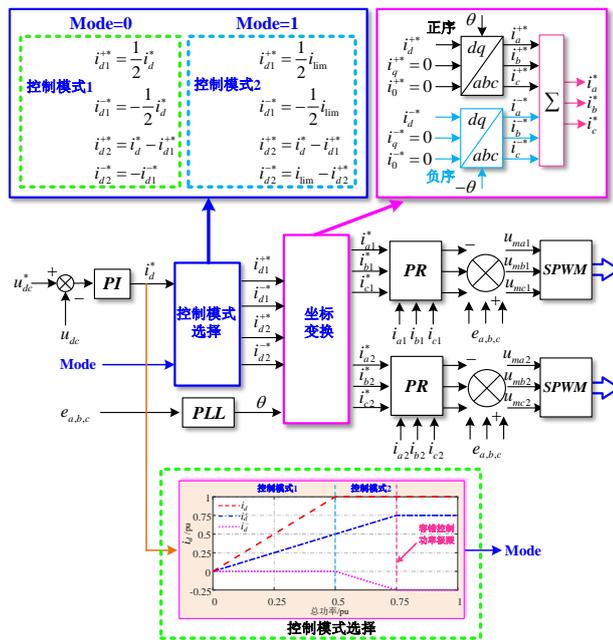


图 A5 并联型风电变流器的桥臂开路故障容错控制策略

Fig.A5 Open-circuit fault tolerant control for parallel wind power converter

表 A1 变流器系统参数

Table A1 Parameters of converter system

参数	数值	参数	数值
电网电压/kV	35	电网频率/Hz	50
变压器变比/kV	0.69/35	额定容量/(MV·A)	2
网侧电感/ μ H	80	变流器侧电感/ μ H	170
滤波电容/ μ F	466	阻尼电阻/ Ω	0.1
直流母线电压/V	1 200	开关频率/kHz	2

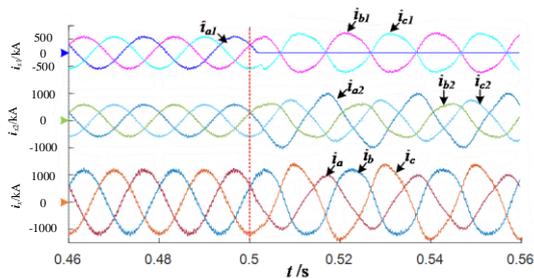


图 A6 工况②下 S_{a1} 所在支路开路故障下各变流器的三相电流

Fig.A6 Three-phase current of each converter under Working Condition ② after S_{a1} arm bridge open-circuit fault