

变频器缺相故障检测及相序自适应方法

王达开, 常 越, 王娇娇, 杨一睿, 张颖聪
(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要: 讨论了四象限变频器的缺相故障快速检测及相序自适应的方法。通过基于双广义二阶积分的软件锁相环, 分别对三相电压正序和负序进行锁相, 获得三相电压在两种相序下的幅值。对三相电压各种情况所对应的正序、负序分量进行分析, 结合锁相环计算出的正序或负序分量的幅值, 分辨出三相电压是否过低或缺相及相序情况。经过 MATLAB/Simulink 仿真验证, 15 ms 内即可对缺相故障及相序做出准确分辨, 证明所述方法切实可行。

关键词: 缺相检测; 相序自适应; 四象限变频器

中图分类号: TN 77 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)08-0110-06

Phase-Loss Detection and Phase-Sequence Adaption Method of Frequency Converter

WANG Dakai, CHANG Yue, WANG Jiaojiao, YANG Yirui, ZHANG Yingcong
(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The method to detect phase-loss and phase-sequence of quadrant frequency converter was focused on. Lock the phase and obtain the amplitudes of positive and negative phase-sequence separately using dual second order generalized integrator PLL (DSOGI-PLL). Analyze all possible three-phase voltage of grid and compute the corresponding positive and negative amplitudes, combined with calculation of DSOGI-PLL in real system, predict the phase-sequence and faults happened to power supply. Simulation based on MATLAB/Simulink and experiment in real system showed that the method could make accurate judgment to faults and sequence of grid within 15 ms.

Key words: phase-loss detection; phase-sequence self-adaption; quadrant frequency Converter

0 引 言

背靠背四象限变频器的脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)整流部分的控制系统是基于正相序的^[1], 故三相电压的相序分辨至关重要。缺相故障对 PWM 整流器影响很大, 三相三线 PWM 整流器缺相后不能运行, 三相四线 PWM 整流器缺相后虽然可以继续运行, 但功能不再完整。

在工业应用中, 实现上述功能多采用专用芯片做鉴相电路, 再根据对跳变沿的检测做出判断^[2-3]。该方法需要专门的硬件电路支持, 成本

高。如果能基于 PWM 整流器已有的三相电压采样电路实现上述功能, 将更加方便且成本低廉。

三相电压的相位信息是 PWM 整流器精确控制的前提。经过多年的研究, 三相锁相环鲁棒性越来越强并得到广泛应用, 可以在三相不平衡跌落、频率突变并含有低次谐波的状态下, 快速且准确地获得电网电压正序以及负序分量的幅值、频率和相位信息, 如基于双广义二阶积分的软件锁相环(Dual Second Order Generalized Integrator PLL, DSOGI-PLL)^[4]。

本文给出了一种基于 DSOGI-PLL 的三相电

作者简介: 王达开(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

常 越(1959—), 男, 副教授, 研究方向为电力电子与电力传动。

王娇娇(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

压故障检测及相序自适应的方法。利用 DSOGI-PLL 对两种可能的相序分别锁相, 利用该锁相环对正序或负序分量的选择性, 结合三相电网电压故障时的正序、负序分量特点, 在 15 ms 内即可对相序、缺相情况做出准确判断。经过仿真验证, 该方法切实可行。

1 相序自适应

1.1 DSOGI-PLL 正序分量锁相原理

DSOGI-PLL 在单同步坐标系软件锁相环 (Single Synchronous Reference Frame Software PLL, SSRF-SPLL) 的基础上, 通过构建基于二阶广义积分器的自适应滤波器实现对负序分量和谐波的滤除, 进而对电网电压的正序分量进行准确且快速锁相。

利用对称分量法^[5], 三相电网电压 U_{abc} 的正序分量 U_{abc}^+ 可以表示为

$$U_{abc}^+ = [U_a^+ \ U_b^+ \ U_c^+]^T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} U_{abc} = T^+ U_{abc} \quad (1)$$

其中:

$$\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

对三相电网电压 U_{abc} 做 Clark 变换, 则两相静止坐标系 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压 $U_{\alpha\beta}$ 为

$$U_{\alpha\beta} = [U_\alpha \ U_\beta]^T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} U_{abc} = T_{\alpha\beta} U_{abc} \quad (2)$$

$\alpha\beta$ 坐标系下的电压正序分量 $U_{\alpha\beta}^+$ 为

$$U_{\alpha\beta}^+ = T_{\alpha\beta} U_{abc}^+ = T_{\alpha\beta} T^+ U_{abc} = T_{\alpha\beta} T^+ T_{\alpha\beta}^{-1} U_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} U_{\alpha\beta} \quad (3)$$

$$\text{其中: } q = e^{-j\frac{\pi}{2}}, T_{\alpha\beta}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}。$$

由式(3)可知, 要完成电网电压正序分量的提取, 并将负序分量滤除, 需要对输入电压信号进行 90° 的相位偏移, 即生成 qU_α 和 qU_β 。

文献[4]提出了基于二阶广义积分器的 90° 相位偏移方法, 本文不再赘述。三相电压正序分量的锁相, 如图 1 所示。 U_{abc} 为三相电网电压, qU_α' 滞后 U_α' 90° , qU_β' 滞后 U_β' 90° 。该 4 个变量为 DSOGI-PLL 的中间变量, 用于消除负序分量。相位由于采用的是等量坐标变换, 故三相电压的幅值等于 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压矢量和的幅值, 等于 dq 坐标系下的电压矢量和的幅值。故 U_d' 对应三相电压正序分量的幅值。 ω_0 为预计的电网电压频率。值得注意的是, 需要对反馈给 SOGI-QSG 模块的 ω_0 进行适当限幅和滤波, 否则谐振频率不在实际频率附近, 导致锁相失败。 ω_{ff} 可取 $2\pi \times 50$, 相当于给 PI 调节器的积分环节 I 一个初始值和基准值, 加快锁相环的锁相速度。 θ 为锁相环输出的角度。

1.2 DSOGI-PLL 负序分量锁相原理

类似于第 1.1 节中的分析方法, 对三相电网电压的负序分量进行提取, 可得:

$$U_{\alpha\beta}^- = T_{\alpha\beta} U_{abc}^- = T_{\alpha\beta} T^- U_{abc} = T_{\alpha\beta} T^- T_{\alpha\beta}^{-1} U_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} U_{\alpha\beta} \quad (4)$$

$$\text{其中: } T^- = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 & \alpha \\ \alpha & 1 & \alpha^2 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{bmatrix}, \alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

$T_{\alpha\beta}$ 和 $T_{\alpha\beta}^{-1}$ 同式(3)。

在图 1 的基础上, 加入负序锁相, 如图 2 所示。

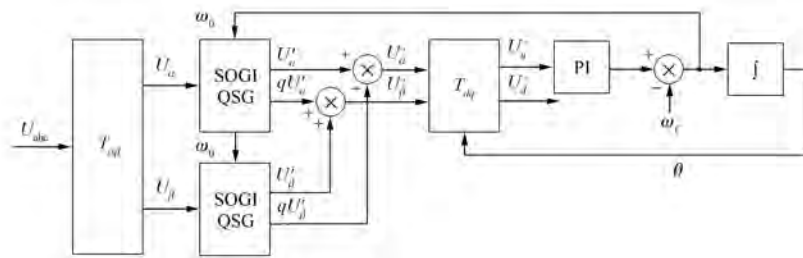


图 1 三相电压正序分量的锁相

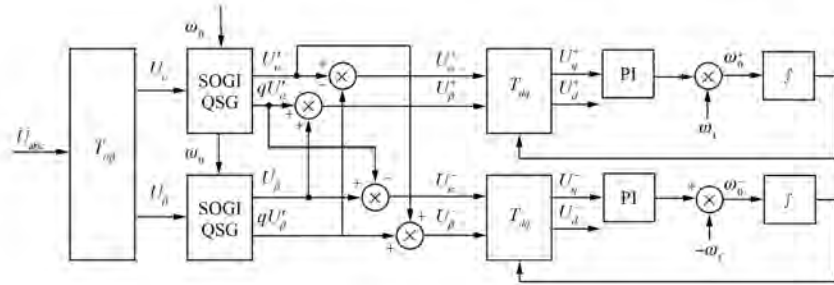


图2 三相电压负序分量的锁相

1.3 相序自适应方法

在没有缺相故障的情况下,首先假设一种相序进行锁相,如果连续 N 个计算周期满足 $U_d^+ \approx U_m$ 且 $U_d^- \approx 0$,则认为相序符合预期,且锁相成功。 U_m 可以根据设备允许运行的最低电压峰值进行选择, N 为 20 ms 内的计算次数,如计算频率为 20 kHz,则 N 为 400。

否则,假定系统为另一种相序,即交换所有 b 相和 c 相采样,并交换 b 相和 c 相的 PWM 输出,重新进行上述判定。如果满足连续 N 个计算周期 $U_d^+ \approx U_m$ 且 $U_d^- \approx 0$,则认为当前相序符合假设。由于相序自适应过程在系统运行前进行,运行过程中并不会发生变化,所以这一过程对时间的要求不高,以准确判断作为首要准则。

2 三相电压缺相情况分析

首先针对平衡的三相电网电压某几相缺相进行分析,得出理想电网电压情况下的结论。对于实际电网出现的三相电压不平衡,只会在平衡的三相电压的正序或负序分量的幅值基础上进行一定范围的变动。

2.1 三相四线制缺相情况分析

由于三相四线制的采样电路各相分别独立,所以某一相或两相缺相不会对其他相的采样造成影响。

2.1.1 单相缺相

不失一般性,假定 a 相缺相,则有 $U_a = 0 \angle \theta$, $U_b = U_m \angle \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$, $U_c = U_m \angle \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$, 其中 U_m 为三相电压幅值,故三相电压的正序分量为

$$U_{abc}^+ = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} U_{abc} =$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} U_m \angle \theta \\ U_m \angle \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ U_m \angle \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

三相电压的负序分量为

$$U_{abc}^- = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 & \alpha \\ \alpha & 1 & \alpha^2 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{bmatrix} U_{abc} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} U_m \angle (\theta - \pi) \\ U_m \angle \left(\theta - \frac{\pi}{3} \right) \\ U_m \angle \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

故 $U_d^+ = \frac{2}{3} U_m$, $U_d^- = \frac{1}{3} U_m$ 可用作判断三相四

线制系统中的单相缺相故障的条件。

2.1.2 两相缺相

不失一般性,假定 a 相和 b 相缺相,则有 $U_a = 0 \angle \theta$, $U_b = 0 \angle \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$, $U_c = U_m \angle \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$, 三相电压正序分量为

$$U_{abc}^+ = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} U_{abc} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} U_m \angle \theta \\ U_m \angle \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ U_m \angle \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

三相电压负序分量为

$$\begin{aligned} U_{abc}^{-} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 & \alpha \\ \alpha & 1 & \alpha^2 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{bmatrix} U_{abc} = \\ &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} U_m \angle \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ U_m \angle (\theta) \\ U_m \angle \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

故 $U_d^{+} = \frac{1}{3}U_m$, $U_d^{-} = \frac{1}{3}U_m$, 可用作判断三相四线制系统中的单相缺相故障的条件。

这里不对零序分量进行考虑的原因是, 零序分量为波动的正弦量, 不能像正序和负序分量一样计算出幅值这个直流量, 而且对正序和负序分量的分析足以对各种缺相情况进行分辨, 故不对零序分量进行分析。

2.2 三相三线制缺相情况分析

三相三线制采样电路如图 3 所示。

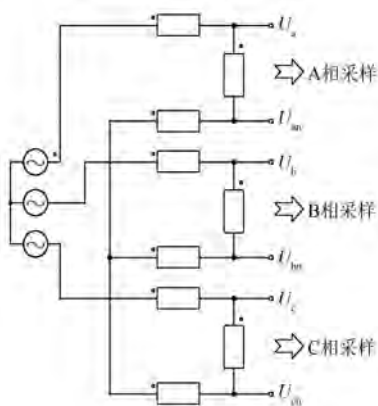


图3 三相三线制采样电路

根据图 3 所采用的采样电路, 三相三线制系统缺单相时, 不失一般性, 假定 a 相缺相, 有:

$$U_a = 0, U'_b = \frac{U_b - U_c}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \angle \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$U'_c = \frac{U_c - U_b}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \angle \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$U_{abc}^{+} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha^2 & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} U_{abc} =$$

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} U_m \angle \theta \\ U_m \angle \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ U_m \angle \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} U_{abc}^{-} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 & \alpha \\ \alpha & 1 & \alpha^2 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{bmatrix} U_{abc} = \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} U_m \angle (\theta + \pi) \\ U_m \angle \left(\theta - \frac{\pi}{3} \right) \\ U_m \angle \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

故 $U_d^{+} = \frac{\sqrt{3}}{3}U_m$, $U_d^{-} = \frac{\sqrt{3}}{3}U_m$, 可用作判断三相

三线制系统中的三相缺相故障。三相三线制系统中不存在两相缺相, 因为一条线不能构成回路。

3 缺相的判断条件

上述理论计算说明, 三相相序和缺相故障都可根据电网电压的正序、负序分量的幅值进行判断。因为在实际系统中, 电网电压是不确定的量, 但是其波动又在一定范围之内, 所以结合以上信息总结出对缺相故障判断的方法。

3.1 三相四线制

电网电压的额定值为 220 V, 要求 PWM 整流器运行的范围是 176~264 V^[6]。

如表 1 所示, 当 $U_d^{-} \approx 0$ 时 (根据经验取阈值为 20 V), 认为三相电压没有缺相故障。这种情况下根据 U_d^{+} 的值来判断电网电压过低、过高或者正常。如果 $U_d^{-} > 20$ V, 则电网电压可能存在缺相。在该情况下根据第 2.1.1 节和第 2.1.2 节的结论, 分辨出三相电压故障为缺一相、缺两相还是没有缺相, 但是不平衡严重。

表 1 三相四线制

PWM 运行电压	$U_d^{+} < 176$ V	$176 \text{ V} \leq U_d^{+} \leq 264$ V	$U_d^{+} > 264$ V
	$U_d^{+} < 20$ V	三相电压过低	三相电压正常
		三相电压过高	
PWM 运行电压	$U_d^{+} < 1.5U_d^{-}$	$1.5U_d^{-} \leq U_d^{+}$	$U_d^{+} > 2.5U_d^{-}$
		$\leq 2.5U_d^{-}$	$2.5U_d^{-}$
$U_d^{-} \geq 20$ V	缺两相	缺一相	未缺相但不平衡严重

3.2 三相三线制

类似于第 3.1 节中的分析,结合第 2.2 节的结论,列出表 2 作为参考。

表 2 三相三线制			
PWM 运行电压	$U_d^+ < 176\text{ V}$	$176\text{ V} \leq U_d^+ \leq 264\text{ V}$	$U_d^+ > 264\text{ V}$
$U_d^- < 20\text{ V}$	电网电压过低	电网电压正常	电网电压过高
PWM 运行电压	$U_d^+ < 1.5U_d^-$	$U_d^+ \geq 1.5U_d^-$	-
$U_d^- \geq 20\text{ V}$	缺一相	未缺相但 不平衡严重	-

4 仿 真

本文的仿真均在标么制系统下进行。设定电网电压幅值 $U_m = 1$ 。

4.1 三相电压正常相序锁相

$U_a = \cos \omega t, U_b = \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), U_c = \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$ 。图 4 所示为正常相序下的三相正序电压锁相波形。图 5 所示为 U_d^+ 在 $t=0.015\text{ s}$ 和 $t=0.065\text{ s}$ 时的值,分别为 1.000 和 1.011。由此可见,锁相环可准确计算出正序分量的幅值,误差约为 1%。图 6 所示为正常相序下的三相负序电压锁相波形,因为负序幅值为零,与图 7 所示 U_d^- 情况对应,在 $t=0.015\text{ s}$ 和 $t=0.065\text{ s}$ 时刻,分别为 0.001 076 和 0.000 7467,误差小于 1%。

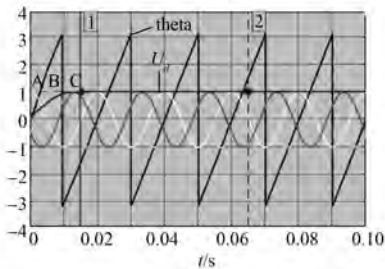


图 4 三相正序电压锁相情况

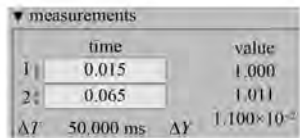


图 5 三相正序电压锁相 U_d^+ 值

4.2 三相四线制缺单相

由第 2.1 节可知,缺单相的情况下, $U_d^+ = 2/3$

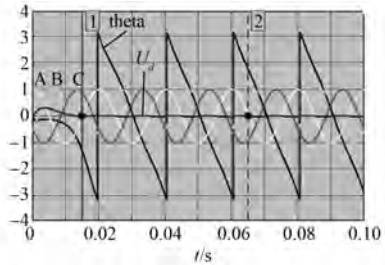


图 6 三相负序电压锁相

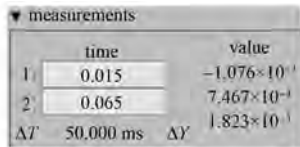


图 7 三相负序电压锁相 U_d^- 值

$U_m, U_d^- = 1/3 U_m$, 这里 $U_m = 1$, 故理论上 $U_d^+ = 0.667, U_d^- = 0.333$ 。由图 8~图 11 可知,在 $t=0\text{ s}$ 时刻锁相环开始工作,在 $t=0.05\text{ s}$ 的时刻发生缺相故障, U_d^+ 在 15 ms 内由 1.000 下降到 0.678 1, U_d^- 在 15 ms 内由 0.001 076 上升到 0.333 4。

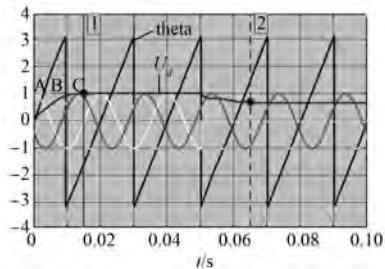


图 8 三相四线制缺单相正序锁相情况

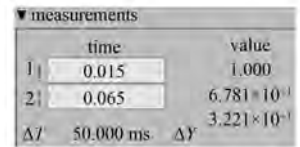


图 9 三相四线制缺单相锁相 U_d^+ 值

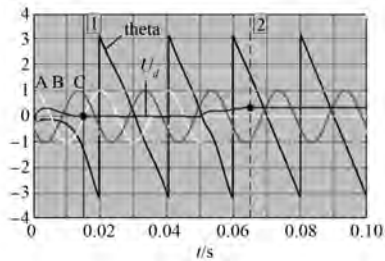


图 10 三相四线制缺单相负序锁相情况

measurements		
time	value	
1	0.015	-1.076×10^{-1}
2	0.065	3.334×10^{-1}
ΔT	50.000 ms	ΔY 3.345×10^{-1}

图 11 三相四线制缺单相锁相 U_d^- 值

4.3 三相四线制缺两相

由第 2.1 节可知, 缺两相的情况下, $U_d^+ = \frac{1}{3}U_m, U_d^- = \frac{1}{3}U_m$, 这里 $U_m = 1$, 故 $U_d^+ = 0.333, U_d^- = 0.333$ 。由图 12~图 15 可知, 在 $t=0$ s 时刻锁相环开始工作, 在 $t=0.05$ s 的时候发生缺相故障, U_d^+ 在 15 ms 内由 1.000 下降到 0.346 7, U_d^- 在 15 ms 内由 0.001 076 上升到 0.327 9。

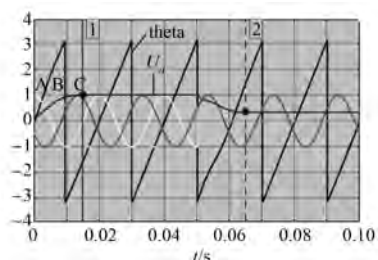


图 12 三相四线制缺两相正序锁相情况

measurements		
time	value	
1	0.015	1.000
2	0.065	3.467×10^{-1}
ΔT	50.000 ms	ΔY 6.535×10^{-1}

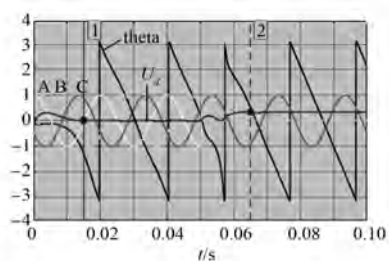
图 13 三相四线制缺两相锁相 U_d^+ 值

图 14 三相四线制缺两相负序锁相情况

measurements		
time	value	
1	0.015	-1.076×10^{-1}
2	0.065	3.379×10^{-1}
ΔT	50.000 ms	ΔY 3.290×10^{-1}

图 15 三相四线制缺两相锁相 U_d^- 值

4.4 三相三线制缺单相

由第 2.2 节可知, 三相三线制缺单相的情况下, $U_d^+ = \frac{1}{2}U_m, U_d^- = \frac{1}{2}U_m$, 这里 $U_m = 1$, 故 $U_d^+ = 0.5, U_d^- = 0.5$ 。由图 16~图 19 可知, 在 $t=0$ s 时刻锁相环开始工作, 在 $t=0.05$ s 的时候发生缺相故障, U_d^+ 在 15 ms 内由 1.000 下降到 0.484 7, U_d^- 在 15 ms 内由 0.001 076 上升到 0.496 5。

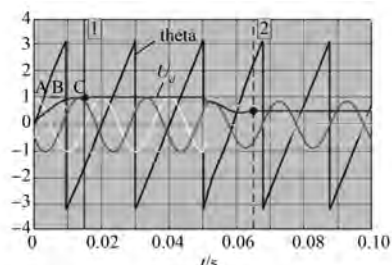


图 16 三相三线制缺一相正序锁相情况

measurements		
time	value	
1	0.015	1.000
2	0.065	4.847×10^{-1}
ΔT	50.000 ms	ΔY 4.155×10^{-1}

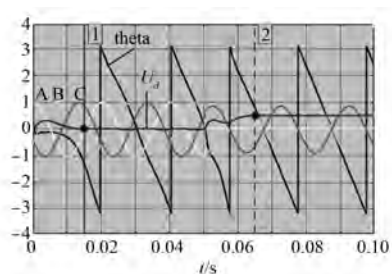
图 17 三相三线制缺一相锁相 U_d^+ 值

图 18 三相三线制缺一相负序锁相情况

measurements		
time	value	
1	0.015	-1.076×10^{-1}
2	0.065	4.965×10^{-1}
ΔT	50.000 ms	ΔY 4.976×10^{-1}

图 19 三相三线制缺一相锁相 U_d^- 值

5 结 语

由理论分析和仿真结果可知, 基于 DSOGI-PLL 对三相电压正序或负序分量的幅值的提取, 结
(下转第 123 页)

- 挂结构动应力研究[J].大电机技术,2012(4): 1-5.
- [7] 李伟力,陈玉红,霍菲阳,等.大型水轮发电机转子旋转状态下磁极间流体流动与温度场分析[J].中国电机工程学报,2012,32(9): 132-139.
- [8] 李伟力,周封,侯云鹏,等.大型水轮发电机转子温度场的有限元计算及相关因素的分析[J].中国电机工程学报,2002,22(10): 86-91.
- [9] 胡田,唐任远,李岩,等.永磁风力发电机三维温度场计算及分析[J].电工技术学报,2013,28(3): 122-126.
- [10] 杜灿勋,桂卫华,周光厚.大型全空冷水轮发电机定子线棒损耗和温度场综合计算[J].中国电机工程学报,2012,32(12): 111-119.
- [11] 梁大伟.大型水轮发电机定子温度与热应力的耦合计算[D].哈尔滨: 哈尔滨理工大学,2012.
- [12] 王国海.三峡右岸全空冷水轮发电机关键技术研究[J].中国电机工程学报,2009,29(15): 74-79.
- [13] 王国海.三峡右岸巨型全空冷水轮发电机组关键技术——水轮机篇[J].大电机技术,2008(4): 30-36.
- [14] 戴庆忠.水冷式水轮发电机特殊问题及三峡水轮发电机冷却方式选择[J].东方电机,1997(2): 1-11.
- [15] 王岩禄.三峡水轮发电机磁极设计特点[J].大电机技术,2003(2): 11-14.
- [16] 徐正蓉.三峡电站 700MW 水轮发电机磁极线圈匝间绝缘试验方法[J].上海大中型电机,2014(3): 44-47.
- [17] 吕日新.三峡水轮发电机磁极装配技术[J].大电机技术,2009(2): 13-14.
- [18] 寇攀高,李超顺,李如海,等.大型水轮发电机温度场与热应力分析[J].水电能源科学,2017(3): 163-166.
- [19] 付敏,邹继斌,孔祥春,等.水轮发电机转子三维温度场的有限元计算[J].电机与控制学报,2001,5(3): 137-139.
- [20] 南日山.大型凸极同步发电机温度场及电磁场的有限元计算[D].哈尔滨: 哈尔滨理工大学,2003.
- [21] 黄世勇.汽轮机转子热应力及寿命分析[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2007.
- [22] 李勇,王亮,张波,等.航空用盘式绕组旋转式音圈电机的热应力与热变形分析[J].电工技术学报,2015,30(12): 181-185.
- [23] 陈锡芳.水轮发电机电磁与计算[M].北京: 中国水利水电出版社,2011

收稿日期: 2018-02-06

(上接第 115 页)

合利用对称分量法对各种相序情况以及缺相情况的分析,将各种情况转化为对应的直流分量,再考虑实际可能出现的三相电压不平衡的情况,分析出可靠的相序自适应方法及缺相故障检测算法。

通过理论分析和仿真表明,本文所提的相序自适应及三相三线/四线缺相故障检测方法切实可行,可对相序进行准确识别,并能够在 15 ms 内对缺相故障做出准确判断。

【参考文献】

- [1] 张崇巍,张兴.PWM 整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 林献坤,余双,陶晨.基于 DSP 的电动执行机构相序检测及缺相保护方法[J].测控技术,2017,36(2): 128-131.
- [3] 王栋,刘利.一种基于单片机的相序检测及电机缺相保护方法[J].电机与控制应用,2006,33(9): 50-52.
- [4] RODRIGUEZ P, TEODORESCU R, CANDELA I, et al. New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions [C] // Power Electronics Specialists Conference, South Korea, 2006: 1-7.
- [5] 刘笙.电气工程基础[M].北京: 科学出版社,2002.
- [6] 配电网禁止同步补偿装置技术规范: DL/T 1216—2013[S].

收稿日期: 2018-01-03