

Research on the High Power ANPC Inverter Applied in Abnormal Condition *

CHEN Rong^{1*}, FENG Junkun¹, XIE Shiyong²

(1.School of Electric Power Engineering, Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu Sichuan 611231, China;

2.China Railway Electrification Bureau Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 618500, China)

Abstract: In the case of high power, active neutral point clamped (ANPC) inverter is widely used because of its uniform device loss. However, in the actual situation, the grid voltage is usually under abnormal conditions, such as three-phase imbalance. Under these abnormal conditions, the control of three-phase grid current is particularly complex. Under this background, a method of positive sequence component extraction for three-phase grid voltage is proposed, which can accurately extract the phase information of three-phase grid voltage and ensure the high-performance control of three-phase grid current. The effectiveness of the proposed method is verified through simulation and experiment.

Key words: abnormal working condition; high power; ANPC; positive sequence component extraction

EEACC: 1210; 8140C

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.01.024

应用于非正常工况下的高功率 ANPC 逆变器研究 *

陈 荣^{1*}, 冯俊琨¹, 谢时勇²

(1.四川水利职业技术学院电力工程学院, 四川 成都 611231; 2.中铁电气化局集团有限公司, 四川 成都 610036)

摘 要: 大功率情况下, 有源中点箝位式 (Active Neutral Point Clamped, ANPC) 三电平逆变器因为其器件损耗均匀被广泛使用。然而, 在实际情况下, 电网电压通常会出现非正常的工况, 如三相不平衡等。在这些非正常工况下, 三相并网电流的控制尤为复杂。在此背景下, 提出采用三相电网电压正序分量提取的方法应用于锁相环, 能够准确提取三相电网电压的相位信息, 从而保证三相并网电流的高性能控制。仿真和实验验证了所提方法的有效性。

关键词: 非正常工况; 高功率; ANPC; 正序分量提取

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2023)01-0138-05

分布式发电系统的发展给电网带来了灵活的调度, 但是也会给微电网的电压质量带来了一定的考验^[1-3]。实际电网中并网点的电压并不都是理想状态的, 谐波和不平衡的工况时常存在, 对于并网变换器而言, 不平衡电网下的并网电流控制尤为重要^[4-5]。

在大功率情况下, 并网逆变器的选择尤为重要, 有源中点箝位 (Active Neutral Point Champed, ANPC) 拓扑结构具有较高的转换效率以及更加均衡的功率损耗, 因此 ANPC 逆变器通常被应用于大功率下的并网结构^[6-8]。然而, 电网电压通常存在非正常工况, 这导致并网电流的控制难度增加。文献[9]提出一种基于矢量比例积分 (Vector Proportional Integral, VPI) 控制器的 PI-VPI 控制策略, PI-VPI 控制器可确保闭环电流控制达到谐振频率处期望的 0° 相位响应, 提高电流闭环控制的稳定性与控制精度。文献[10]提出一种功率振荡与当前谐波抑制的多目标协同控制策

略, 在电压不平衡的情况下, 并网逆变器的输出电能质量可以得到显著改善。文献[11]提出一种基于 BP 神经网络自适应调整电流指令值, 实现并网逆变器多种控制目标协调的优化策略, 实现多种控制目标之间的协调, 提高输出电能质量。文献[12]结合光伏阵列输出功率前馈, 在两相静止坐标系下提出一种直流母线电压外环 PI 控制、并网电流内环有限集模型预测控制的控制策略。

然而对于应用于大功率场合下的 ANPC 逆变器来说, 暂未有文献对不平衡下的并网电流控制进行研究。本文在 ANPC 拓扑结构的基础上, 介绍了该拓扑结构的调制策略以及原理, 然后通过基于正序分量提取的锁相环技术对不平衡的电网进行相位信息提取, 从而达到不平衡电网下的三相并网电流控制。即便在传统的并网电流控制基础上, 依然能够保证不平衡电网下的高性能逆变器控制。

项目来源: 四川水利职业技术学院院级科研项目 (KY2019-12)

收稿日期: 2021-07-30

修改日期: 2021-11-12

1 ANPC 拓扑

图 1 所示为 ANPC 的拓扑电路图,ANPC 电路结构具有 18 个 IGBT,每个 IGBT 上都具备一个反并联二极管,与二极管箝位式(Neutral Point Clamped, NPC)三电平逆变器不同的是,ANPC 是将 NPC 型三电平逆变器的中间箝位二极管全部替换成 IGBT 反并联二极管的形式,这样有利于高功率工况下的器件功率均分。因此,ANPC 电路结构具有器件损耗分布均匀、发热均匀的优点。

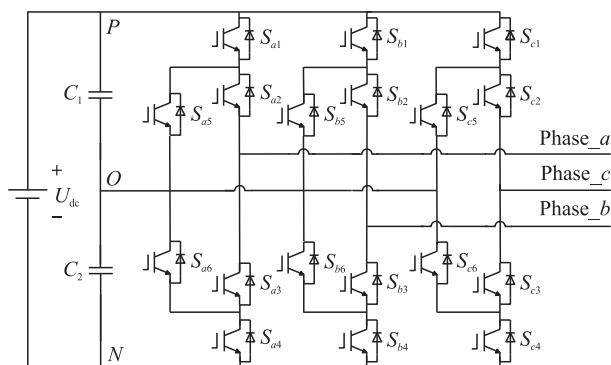


图 1 ANPC 电路结构

当图 1 中的所有 IGBT 都具备驱动电路以及 PWM 信号,就可以将直流侧的直流电压经过 ANPC 转换为交流电压信号。表 1 所示是 IGBT 驱动信号与对应的逆变器输出电压的对应规则,其中,表 1 是以 a 相为例,且 1 表示 IGBT 导通,0 表示 IGBT 关断。

表 1 IGBT 驱动信号与对应的逆变器输出电压对应规则

开关状态	开关序列						输出电压
	S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{a4}	S_{a5}	S_{a6}	
+	1	1	0	0	0	1	$+V_{dc}/2$
0U2	0	1	0	0	1	0	0
0U1	0	1	0	1	1	0	0
0L1	1	0	1	0	0	1	0
0L2	0	0	1	0	0	1	0
-	0	0	1	1	1	0	$-V_{dc}/2$

从表 1 中可以看出, S_{a6} 的导通与否,对于逆变器的输出电压来说并无影响。但是,在逆变器输出电压的动态变化过程中(如 $+V_{dc}/2$ 变化为 0,0 变化为 $-V_{dc}/2$ 均为动态变化),如果 S_{a6} 在 ANPC 输出电压为 $+V_{dc}/2$ 时的开关状态为 1,那么,在动态的变化中, S_{a6} 就没有功率损耗。然而,当 S_{a6} 在 ANPC 输出电压为 $+V_{dc}/2$ 时的开关状态为 1,且 S_{a1} 和 S_{a2} 的开关状态也为 1,那么在动态过程中, S_{a3} 和 S_{a4} 的开关状态由 1 变为 0 的时候,直流侧电压能够均匀的分布在 S_{a1} 、 S_{a2} 和 S_{a6} 之间。因此,可以总结以下结论:当

ANPC 输出电压为 $+V_{dc}/2$ 时,需要 S_{a1} 、 S_{a2} 和 S_{a6} 的开关状态为 1;当 ANPC 输出电压为 $-V_{dc}/2$ 时,需要 S_{a3} 、 S_{a4} 和 S_{a5} 的开关状态为 1。

2 调制策略

图 2 所示为 ANPC 的调制策略驱动信号逻辑图,图中, U_s 为控制信号的输出调制信号, U_{c1} 和 U_{c2} 是高频三角载波信号。从图 2 中可以看出,各相的 6 个 IGBT 中,当调制波大于 0 时, $U_s > U_{c1}$ 且 $U_s > U_{c2}$ 时,脉冲输出 $+V_{dc}/2$; $U_s > U_{c1}$ 且 $U_s < U_{c2}$ 时,脉冲输出 0U1; $U_s < U_{c1}$ 且 $U_s > U_{c2}$ 时,脉冲输出 0L2。当调制波小于 0 时, $U_s < U_{c1}$ 且 $U_s < U_{c2}$ 时,脉冲输出 $-V_{dc}/2$; $U_s > U_{c1}$ 且 $U_s < U_{c2}$ 时,脉冲输出 0L1; $U_s < U_{c1}$ 且 $U_s > U_{c2}$ 时,脉冲输出 0U2。

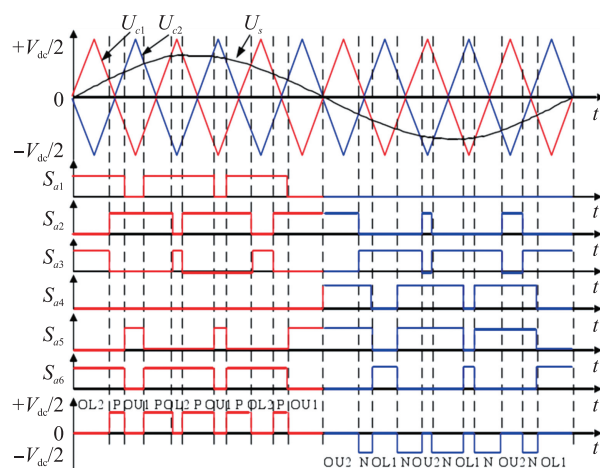


图 2 调制策略

3 基于正序分量提取的锁相环技术

锁相环是为了得到电网电压相位,从而得到并网电流的给定信号,使得并网电流与电网电压同相位,降低无功,增大发电量。当电网电压不平衡时,常规的锁相环可能会无法正常工作,这样就无法向逆变器提供正确的相位信息,使得逆变器无法正常工作。

在实际中电网常会出现非理想情况,此时电网电压可以分解为正序分量、负序分量和零序分量,表示如下:

$$U = U^P + U^N + U^0 \quad (1)$$

式中: U 为三相电压信号, U^P 为电网电压正序分量, U^N 为电网电压负序分量, U^0 为电网电压零序分量。

因此三相电网电压可以表示为:

$$\begin{cases} U_a = U_a^P + U_a^N + U_a^0 \\ U_b = U_b^P + U_b^N + U_b^0 = \gamma^2 U_a^P + \gamma U_a^N + \gamma^3 U_a^0 \\ U_c = U_c^P + U_c^N + U_c^0 = \gamma U_a^P + \gamma^2 U_a^N + \gamma^3 U_a^0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $y = e^{j120^\circ}$, $y^2 = e^{j240^\circ}$, $y^3 = 1$, 且 $y^3 + y^2 + y = 0$ 。 U_x 为 x 相电网电压, U_x^P 为 x 相电网电压正序分量, U_x^N 为 x 相电网电压负序分量, U_x^0 为 x 相电网电压零序分量, $x = a, b, c$ 。

通过式(2)可得:

$$\begin{cases} U_a^P = \frac{1}{3}(U_a + yU_b + y^2U_c) \\ U_a^N = \frac{1}{3}(U_a + y^2U_b + yU_c) \\ U_a^0 = \frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c) \end{cases} \quad (3)$$

可以求得三相正序分量为:

$$\begin{cases} U_a^P = U_a^P \\ U_b^P = y^2 U_a^P \\ U_c^P = y U_a^P \end{cases} \quad (4)$$

使用 PI 控制器使变换后输出的电网电压无功分量趋近于 0, 从而完成电网电压相位的锁定, 控制框图如图 3 所示。

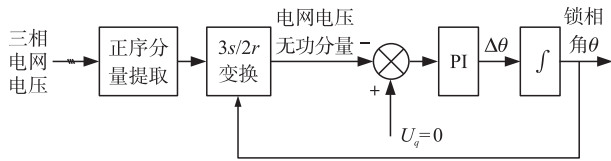


图 3 锁相环控制框图

4 并网电流控制算法

图 4 所示为电流解耦控制框图, 在 dq 坐标系下, 电压电流在 d 、 q 轴的分量均为直流, 且在 PI 环节的调节下可以实现无静差调节, 电流 i_q 前向通道含有关于 i_d 的负分量, 而电流 i_d 的前向通道也含有关于 i_q 的正分量, 为实现解耦。

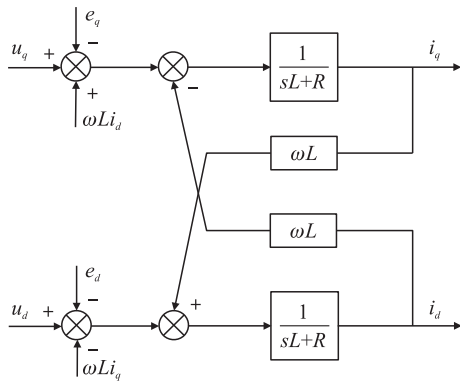


图 4 电流解耦控制框图

图 5 所示为电流内环控制框图, T_d 为 PWM 信号延迟时间, 一般取 0.5 倍的开关周期, K_{PWM} 则表示变换器开关增益系数。

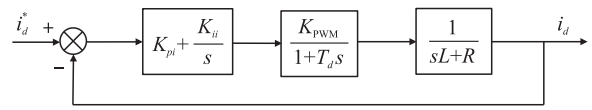


图 5 电流内环控制框图

式(2)为电流内环的开环传函:

$$G_{io}(s) = \frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s} \cdot \frac{K_{PWM}}{1 + T_d s} \cdot \frac{1}{sL + R} = \frac{K_{pi}K_{PWM}}{sL(T_s + 1)} \quad (5)$$

从而得到电流内环的闭环传函为:

$$H(s) = \frac{G_{io}(s)}{G_{io}(s) + 1} = \frac{2K_{pi}K_{PWM}/T_s}{s^2 + 2Ls/T_s + 2K_{pi}K_{PWM}/T_s} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

由上式可明显看出, 电流内环是一个标准的二阶系统, 而根据经验, 一般将 ξ 取为 0.707, 系统能够具有较好的快速性、动态响应及稳定性。可取 PI 参数如下:

$$\begin{cases} K_{pi} = \frac{1}{2\xi^2 T_s K_{PWM}} \\ K_{ii} = \frac{R}{2\xi^2 T_s K_{PWM}} \end{cases} \quad (7)$$

5 结果验证

为了验证本文所提内容的有效性, 利用 PSIM 软件以及如图 6 所示的实验平台进行验证。

图 7 所示为三相电网电压平衡时的并网电流以及直流侧电压仿真波形。从图中可以看出, 直流侧两个电容电压一致, 中点电位平衡。同时, 三相并网电流保持正弦, 三相对称。

图 8 所示为三相电网电压不正常时的并网电压以及电流仿真波形。三相电压都不正常的工况包括: 单相接地、两相短路、三相不平衡。从图中可以看出, 在电网电压不正常工况时, 三相并网电流都能保持正弦对称。

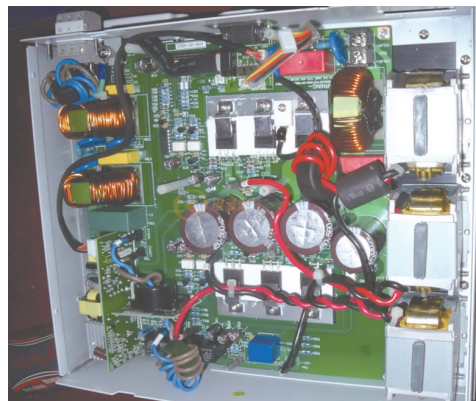


图 6 实验平台

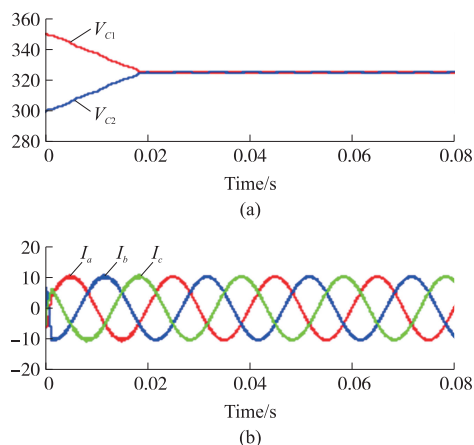


图7 三相电网电压平衡时的并网电流以及直流侧电压仿真波形

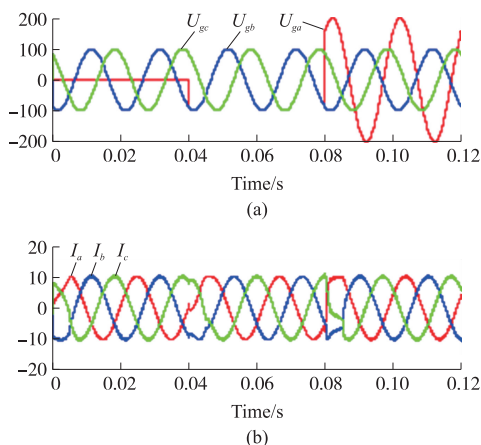


图8 三相电网电压不正常时的并网电压以及电流仿真波形

图9所示为三相电网电压正常时的三相电网电压以及三相并网电流实验波形。从图9(b)中可以看出

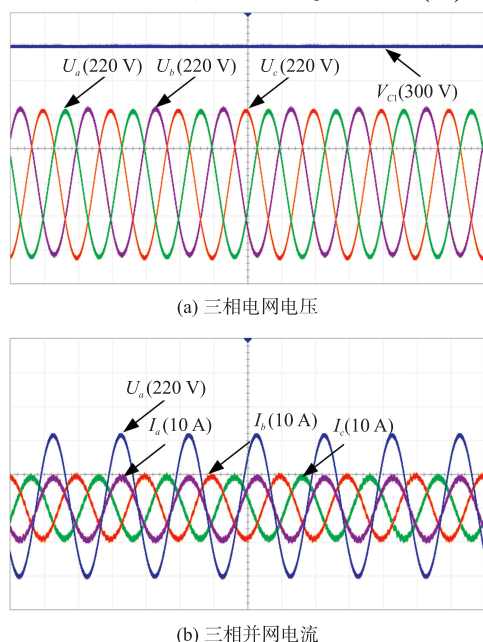


图9 三相电网电压正常时的并网电压以及电流实验波形

看出,电网电压正常时,三相并网电流正弦且对称,三相并网电流与电压同相位。

图10所示为三相电网电压不平衡时的三相电网电压以及三相并网电流实验波形。从图9(b)中可以看出,电网电压正常时,三相并网电流正弦且对称,三相并网电流与电压同相位。

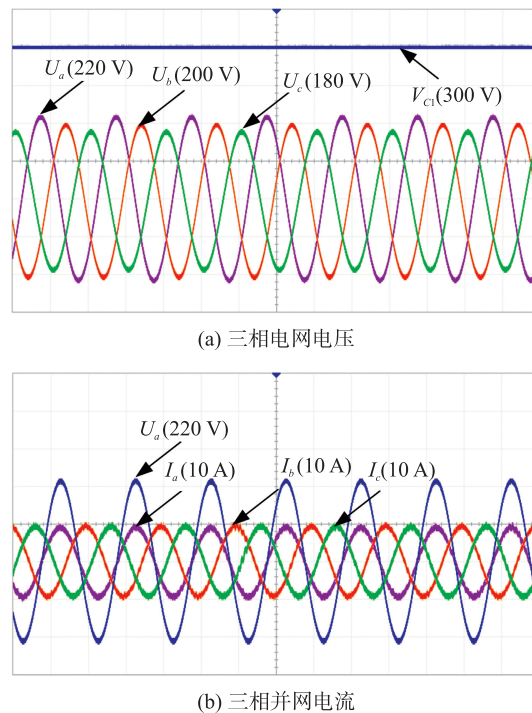


图10 三相电网电压不正常时的并网电压以及电流实验波形

6 结语

ANPC 拓扑结构作为大功率并网逆变器常用的三电平逆变器结构,具有损耗均匀的优势,在大功率情况下,均匀的损耗能够对开关器件有保护作用。本文介绍了在电网非正常工况下的并网电流控制,提取不正常工况下的正序电压分量,能够对三相电流进行控制,在电网非正常工况下依然能够保证三相并网电流正弦且对称,使得 ANPC 具有良好的并网性能。

参考文献:

- [1] 冬雷,田昊雷,肖辅荣,等. 基于有源电力滤波与谐波补偿的孤岛检测方法[J]. 太阳能学报,2021,42(4): 133-138.
- [2] 杨擎宇,薛太林,张昊杰. 基于混沌系统的分布式发电系统孤岛检测[J]. 电气自动化,2021,43(2): 77-80.
- [3] 潘斌,方嵩,李国号,等. 含分布式发电并网虚拟发电厂鲁棒优化经济调度方法[J]. 可再生能源,2021,39(2): 278-284.
- [4] 王锐彬,牛晨晖,史明明,等. 非单位功率因数运行下

- HERIC 型并网逆变器软开关技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4975-4983.
- [5] 张冶, 蔡颖凯, 曹世龙, 等. 多逆变器并联系统输出电压不平衡度补偿策略[J]. 电力电子技术, 2021, 55(6): 95-98, 103.
- [6] 胡存刚, 马大俊, 王群京, 等. 三电平有源中点钳位逆变器损耗分布平衡控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 129-138.
- [7] 於静, 莫修权, 徐楠. 矿山高压三电平 ANPC 变频器预测控制研究[J]. 工矿自动化, 2016, 42(10): 85-90.
- [8] 刘战, 谭国俊, 李浩, 等. 基于空间电压矢量的有源中点箝位型五电平逆变器母线中点电压平衡问题的研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6499-6507.
- [9] 王素娥, 王子婷, 郝鹏飞. 电网不平衡下并网逆变器的矢量比例积分控制[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 99-106.
- [10] 崔金豹. 不平衡电压条件下并网逆变器多目标协同控制[J]. 电力电子技术, 2021, 55(5): 105-109.
- [11] 赵楠, 李岚, 杨琦, 等. 面向不平衡电网的并网逆变器基于 BP 神经网络的多目标协调优化策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 131-138.
- [12] 李亚宁, 高晓红. 不平衡电网电压下 T 型三电平光伏并网逆变器的有限集模型预测控制[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 7-13.



陈 荣(1981—), 男, 四川德阳人, 副教授, 硕士学位, 主要研究方向: 电力系统自动化, 282346822@qq.com。