

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2013.04.009

逆变器的典型控制方法与电气仿真分析

刘永晓, 赵晋斌, 张元吉, 杨旭红

(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 在讨论逆变器几种典型的控制方法优缺点的基础上, 围绕其相关改进方法进行了论述. 针对控制方式的特点和存在的问题, 使用电气仿真软件搭建了相关模型, 并用仿真结果进行验证.

关键词: 逆变器; 控制方法; 电气仿真

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1006-4729(2013)04-0343-05

Analysis of the Inverter Typical Control Methods and Simulation Based on the PSIM

LIU Yongxiao, ZHAO Jinbin, ZHANG Yuanji, YANG Xuhong

(School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: On the basis of the discussion of the advantages and defects of the typical control methods of the inverter, the related improvement methods are introduced. As to the characteristics and existing problems of the control modes, the electric power simulation software is applied to set up the model. The related contents and illustration are verified through the simulation analysis.

Key words: inverter; control method; electric power simulation

绝缘栅双极型晶体管等可控型电力电子器件的飞速发展极大地促进了交流驱动技术的进步. 电压型逆变器因其具有开关器件电压应力低、输出电压纹波小等优点, 在交流传动、不间断电源和有源滤波器等高性能电力电子装置中得到了广泛应用.

分布式并网发电系统的大量应用, 使得逆变器控制方法的研究日益受到重视. 本文在介绍常见的控制方式、讨论各自的优缺点基础上, 围绕相关改进方法予以说明. 同时, 使用电气仿真

(Power Simulation, PSIM) 软件搭建相关模型, 并通过仿真波形说明各控制方式的特点和存在的不足.

1 控制方法

1.1 SPWM 控制

正弦脉冲宽度调制 (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) 控制方法往往需要比较复杂的控制算法才能达到一定的输出效果^[1], 而且受

收稿日期: 2012-11-19

通讯作者简介: 刘永晓 (1988-), 男, 在读硕士, 河北邯郸人. 主要研究方向为直流变换器及逆变器控制. E-mail: liuyongxiao0511@163.com.

基金项目: 上海市教育委员会重点学科建设项目 (J51303); 上海市重点科技攻关项目 (11510500800); 上海市教育委员会科研创新重点项目 (13ZZ132); 上海市科学技术委员会浦江计划 (12PJ1403900).

死区影响较为严重,目前还没有一种较好的方法能用来消除死区效应在 SPWM 控制方法中的影响,通常我们采用三角波调制,虽然三角波调制方式的开关频率被固定,但响应速度慢。

电流型逆变器通常采用正弦调制波和变频锯齿波载波比较的方式产生脉冲。此种方法如果在逆变器直流输入电流中含有脉动成分,则交流输出电流中的谐波就会增加。为了抑制这些谐波,人们采用了有源滤波和无源滤波,但都存在着电路太复杂,或成本太高,或抑制效果不太理想^[2]等问题。

随着各种脉宽调制技术的出现,各种型号规格的变频器产品不断涌现,尤其是级联式多电平变频器,采用串联功率单元结构实现了高压输出,具有对电网谐波污染较小、输出电压和电流谐波含量较低等特点,是当今最有发展前途的技术之一^[3]。

1.2 滞环控制

逆变器采用电流滞环控制,具有实时控制输出电流,以及动态响应快等优点,是直接电流控制通常采用的方法。由于固定环宽的电流滞环控制的开关频率变化范围大,导致滤波器设计困难^[4]。文献[5]至文献[7]分别采用最小二乘算法、积分法,以及电压空间矢量法实现定频滞环电流跟踪控制,方便了滤波器的设计,但控制算法复杂,软件实现比较困难。

文献[8]至文献[11]适用于单相和三相并网逆变器的滞环跟踪控制原理及数学分析。

文献[8]有如下数学分析:电感电流在一个开关周期内脉动一次。设电流上升时间和下降时间分别为 t_1 和 t_2 ,开关周期 $T = t_1 + t_2$,电流变化环宽为 $2H$ 。经过分析与计算得:

$$t_1 = \frac{2HL}{U_d - U_s} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{-2HL}{-U_d - U_s} \quad (2)$$

则开关管的一个开关周期为:

$$T = t_1 + t_2 = \frac{4HLU_d}{U_d^2 - U_s^2} \quad (3)$$

开关管的开关频率为:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{U_d^2 - U_s^2}{4HLU_d} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知,当电网电压在 $(2n + 1)\pi/2$ ($n = 0, 1, 2$) 附近时,开关管的开关频率最

低,开关周期最长。电网电压在 $n\pi$ ($n = 0, 1, 2$) 时,开关管的开关频率最高,开关周期最短。

在直流母线电压、电网电压和输出电感一定时,逆变器的开关频率由电流滞环环宽决定。正弦环宽由恒频控制,对环宽 H 进行动态调整,能够恒定开关频率,可解决滤波器设计问题。

滞环调制采用瞬时值比较方式,虽存在开关频率不固定的缺点,使滤波器设计困难,但它具有自动峰值限制能力,以及电流跟踪精度高、动态响应快、不依赖负载参数和无条件稳定等优点。滞环调制方式又分两态调制和三态调制两种。两态调制只有输入能量和回馈能量两个状态,故逆变器桥臂中点电压 U_{AB} 是双极性变化的;而三态调制除了输入能量和回馈能量两个状态外,另有续流状态, U_{AB} 在半个输出周期内是单极性调制,在相同开关频率下电流脉动比两态调制时小^[12-14]。文献[9]指出了三态滞环控制在并网电流波形质量和效率方面都优于两态滞环控制。脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)滞环跟踪控制是一种有效的实时控制方法,具有系统稳定性好、电流跟踪性能好、响应快、不用载波等优点,适合于逆变器并网运行控制。

文献[9]采用同步锁相方法,通过软件实现全数字化的滞环电流控制。该方法具有响应速度快、抗干扰能力强、输出功率因数高、工作可靠等优点,具有实用价值。

1.3 空间矢量调制控制

三相逆变器只有 8 种开关状态,在其相应的 8 种基本电压空间矢量中,包括 6 个有效电压空间矢量和两个零矢量。利用 8 种基本矢量的作用时间不同可等效合成所需的旋转空间矢量 U_r 。文献[15]针对两个零矢量作用时间相等的情况,证明了在正弦波注入零序分量作为调制波的规则采样 PWM 与准优化对称空间矢量调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)的等效性,给出了相应的调制函数表达式。文献[16]和文献[17]给出了一种包含 SPWM、连续 SVPWM,以及两种不连续 SVPWM 的调制函数表达式。文献[18]阐明了求解准优化对称 SVPWM 和几种典型不连续 SVPWM 调制波的方法原理。然而至今未见有研究文献提出可以直接使用的、包含 SPWM 和各种连续与不连续 SVPWM 方法的统

一 PWM 调制函数表达式. 规则采样法是常用的实现载波 PWM 的数字化方法. 传统的 SVPWM 直接数字化方法需进行复杂的坐标变换、三角函数运算、扇区判断, 以及有效矢量作用时间的计算等^[19]. 文献[20]和文献[21]提出了只需进行坐标变换和扇区判断, 并通过查表求出有效矢量作用时间的简化方法. 文献[16]、文献[22]至文献[24]对 SVPWM 数字化方法作了进一步简化, 直接根据参考相/线电压瞬时值的正负判断扇区, 用线电压求有效矢量的作用时间. 文献[25]和文献[26]采用相电压瞬时值直接计算 PWM 波脉宽时间, 并给出了准优化对称 SVPWM 和 4 种不连续 SVPWM 波脉宽计算公式, 但未给出适用于 SPWM 和各种连续与不连续 SVPWM 方法的统一 PWM 快速算法.

SVPWM 可以更灵活地组合开关模式, 开关损耗小, 易于数字实现, 电压利用率高, 因此受到了重视和研究. 但目前通常采用的 SVPWM 仍是需要从空间矢量图中寻找参考电压矢量所在的小三角形而后计算作用时间^[27], 这使算法在应用于更高电平的变换器控制时, 变得尤为复杂. 而且主电路为二极管箝位电路时, 存在着固有的直流侧电容电压不平衡问题, 这将导致输出电压中包含偶次谐波, 因此在 PWM 算法中必须考虑中点电位控制^[28].

SVPWM 在多电平逆变器的控制中应用广泛, 但是随着电平数的增加, 其控制算法渐趋复杂化. 文献[29]提出的 3 电平 SVPWM 控制方法, 将 3 电平电压矢量区变换为由 2 电平空间矢量区构成, 从而通过使用 2 电平 SVPWM 方法简化控制算法. 该方法理论上可应用于更高电平逆变器的控制中. 仿真验证了方法的可行性.

1.4 无差拍控制

无差拍控制^[30, 31]是一种基于电路模型的控制方法, 其控制思想是通过采样各状态变量值, 计算出当前控制周期内的开关状态, 使受控量在控制周期内达到与参考值相等.

无差拍控制是在预测控制基础上发展起来的全数字化 PWM 技术, 其优点是动态响应快, 可预测谐波电流的变化趋势, 准确跟踪指令电流, 得到高质量的馈入电网电流^[32], 并易于计算机执行; 缺点是对预测模型的依赖性较大, 因算法复杂导

致预测周期增大, 进而引起较大的预测误差, 最终影响补偿效果, 这些缺点阻碍了无差拍控制的应用.

改进算法的控制精度与传统算法十分接近; 与定时比较控制法相比, 改进算法可减少部分硬件环节, 提高数字化程度.

2 控制仿真与结果分析

2.1 SPWM 控制仿真与结果

$U_{dc} = 600 \text{ V}$, $R = 0.1 \Omega$, $L = 2 \text{ mH}$, 仿真时间为 160 ms, 电流稳定值单相最大值约为 400 A. I_u , I_v , I_w 为三相电流值. 其仿真和输出波形见图 1 和图 2.

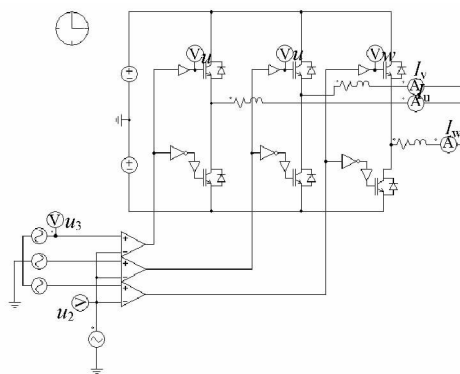


图1 SPWM 控制仿真示意

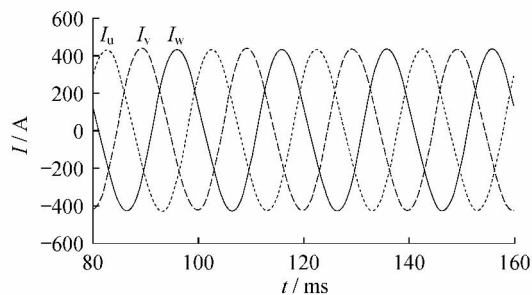


图2 SPWM 控制输出波形

2.2 滞环控制仿真与结果

$U_{dc} = 1\ 000 \text{ V}$, $L = 25 \text{ mH}$, 仿真时间为 60 ms, 单相电流最大值为 3 A. I_u , I_v , I_w 为三相电流值, I_{un} , I_{vn} , I_{wn} 为三相参考电流值. 其仿真和输出波形见图 3 和图 4.

2.3 SVPWM 控制仿真与结果

$U_{dc} = 450 \text{ V}$, $R = 3.87 \Omega$, $L = 7.7 \text{ mH}$, $U_s = 0.98 \text{ V}$, 仿真时间为 60 ms, 单相电流最大值约为

40 A I_u I_v I_w 为三相电流值. 其仿真和输出波形见图 5 和图 6.

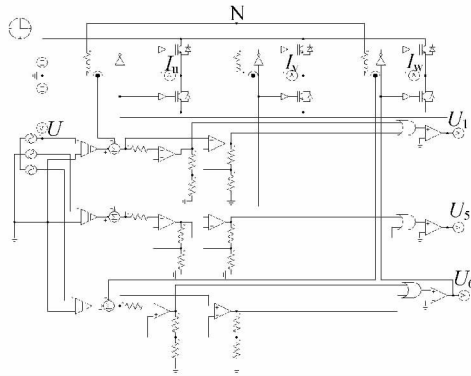


图 3 滞环控制仿真示意

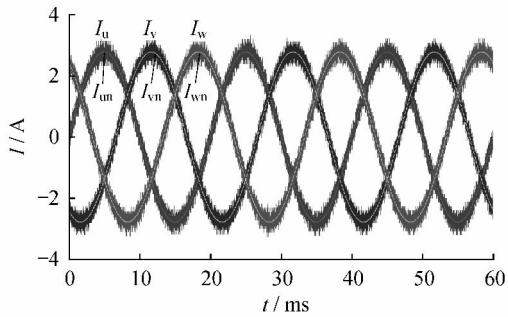


图 4 滞环控制输出波形

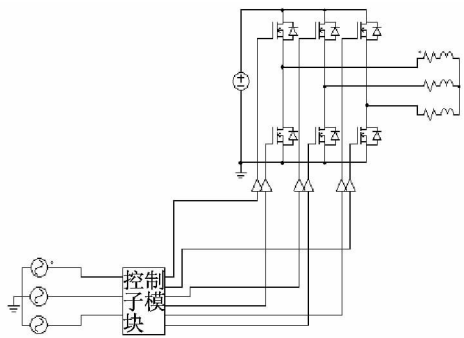


图 5 SPWM 控制仿真示意

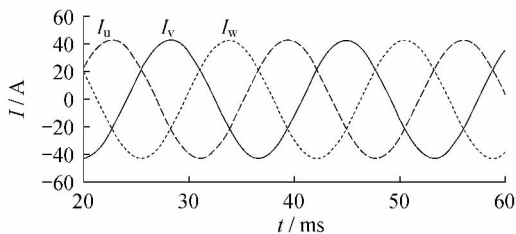


图 6 SPWM 控制输出波形

2.4 无差拍控制仿真与结果

$U_{dc} = 600$ V, $R = 0.1$ Ω , $L = 2$ mH, 仿真时间

为 80 ms 单相电流最大值约为 180 A I_u I_v I_w 为三相电流值. 其仿真和输出波形见图 7 和图 8.

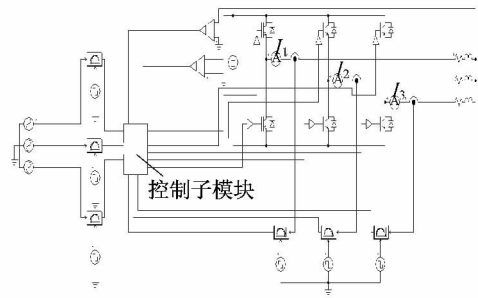


图 7 无差拍控制仿真示意

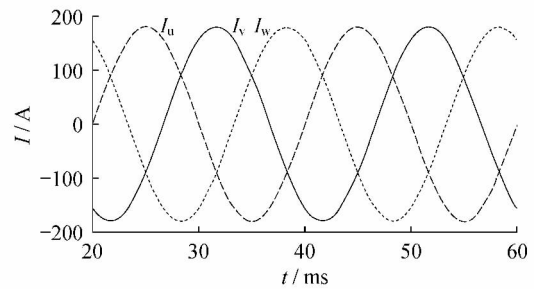


图 8 无差拍控制输出波形

2.5 各控制方式结果比较

以上 4 种典型控制方式的仿真结果如表 1 所示.

表 1 典型控制方式仿真参数与结果

控制方式	电源 /V	电阻 / Ω	电感 /mH	时间 /ms	相电流最大值/A
SPWM	600	0.10	2.0	160	400
滞环	1000	0	2.5	60	3
SVPWM	450	3.87	7.7	60	40
无差拍	600	0.10	2.0	80	180

注: 表中电阻和电感为阻感负载的取值.

通过对以上各控制仿真模型的搭建和输出结果的分析, 可知 SPWM 和单周期控制模型搭建较为简单, SVPWM 和无差拍控制模型搭建较为复杂, 滞环控制介于两者中间.

虽然滞环控制模型搭建较为容易, 但从输出波形的效果来看, 滞环控制输出的波形所含谐波量较大, 这是由于对滞环控制环宽的调节较为困难, 因此最终波形的输出效果要受到环宽等多方面因素的制约, 调节参数耗时较长.

运用三角波调制来实现 SPWM 对逆变器的控制, 但在仿真过程中, 该模型所需的仿真时间比

其他控制方式长,这是由于该模型在仿真过程中内部计算较为复杂,计算量较大。

就输出波形效果看,无差拍控制效果更好,从过渡到最终稳态时间不到 $1/8$ 周期,SVPWM相比要差一些,SPWM从过渡到最终稳态的时间最长。

3 结 语

每一种控制方法都有其优缺点,在运用中要结合实际情况,综合考虑各种因素后进行正确选择,以达到目标追求的最优化。随着工业技术的发展,必然要求新的与之相适应的控制技术和理论,因此在今后将会有越来越多的学者进行研究,并提出新的控制理论和控制方式,最终运用于生产实际。

参考文献:

- [1] 郑诗程,丁明,苏建徽,等.基于重复控制和电压前馈控制的光伏并网发电系统研究与设计[J].电源技术应用,2005,8(2):10-13.
- [2] 袁兆凯,张加胜,刘希臣.三相电流型逆变器的PWM控制方法研究[J].变频器世界,2008(1):45-47.
- [3] 周凌,葛照强.PWM逆变器优化控制策略的分析研究[J].电气自动化,2008,30(5):29-31.
- [4] 闫士职.基于太阳能光伏发电并网系统的研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [5] 邹晓,易灵芝,张明和,等.单相并网逆变器的定频滞环电流控制[J].测控技术,2008,27(7):77-78.
- [6] 岳舟,谭甲凡.单相并网逆变器的定频滞环电流控制新方法[J].电源技术,2010,34(1):67-68.
- [7] 邹晓,易灵芝,张明和,等.光伏并网逆变器的定频滞环电流控制新方法[J].电力自动化设备,2008,28(4):59-60.
- [8] 洪峰,单任仲,王慧贞,等.一种变环宽准恒频电流滞环控制方法[J].电工技术学报,2009,24(1):116-117.
- [9] 范小波,张代润.光伏并网逆变器数字滞环控制的研究[J].电力电子技术,2006,40(6):46-47.
- [10] 戴训江,晁勤.光伏并网逆变器电流滞环跟踪控制[J].电源技术,2009,33(7):598-599.
- [11] KANG B J, LIAW C M. Robust hysteresis current-controlled PWM scheme with fixed switching frequency [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2001, 148 (6): 503-512.
- [12] 孙驰,毕增军,魏光辉.一种新颖的三相四桥臂逆变器解耦控制的建模与仿真[J].中国电机工程学报,2004,24(1):124-130.
- [13] BAKER D M, AGELIDIS V G, NAYER C V. Comparison of tri-level and bi-level current controlled grid-connected single-phase full-bridge inverters [C] // IEEESIE, Guimaraes, Portugal, 1997: 463-467.
- [14] BODE G H, HOLMES D G. Implementation of three level hysteresis current control for a single phase voltage source inverter [C] // IEEE PESC, Galway, UK, 2000: 33-38.
- [15] 吴茂刚,赵荣祥,汤新舟.正弦和空间矢量 PWM 逆变器死区效应分析与补偿[J].中国电机工程学报,2006,26(12):102-105.
- [16] BOWES S R, LAI Y S. The relationship between space vector modulation and regular sampled PWM [J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 1997, 44 (5): 670-679.
- [17] ZHOU K L, WANG D W. Relationship between space vector modulation and three phase carrier based PWM: a comprehensive analysis [J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2002, 49 (1): 186-195.
- [18] LASKO V B. Analysis of hybrid PWM based on modified space vector and triangle comparison methods [J]. IEEE Trans. on IAS, 1997, 33(3):756-764.
- [19] HAVA A M, KERMEN R J, LIPO T A. Simple analytical and graphical methods for carrier based PWM VSID rives [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1999, 14(1):49-61.
- [20] 杨贵杰,孙力,崔乃政,等.空间矢量脉宽调制方法的研究[J].中国电机工程学报,2001,21(5):79-83.
- [21] 孙文焕,程善美,秦忆.基于FPGA的空间矢量PWM的实现[J].电气传动,2000,35(6):21-24.
- [22] 何罡,杨耕,袁日轩.基于非标准正交基的空间电压矢量快速算法[J].电力电子技术,2003,37(6):1-3.
- [23] 郑琼林,郝荣泰.关联指令分区控制脉宽调制技术[J].中国电机工程学报,2000,20(6):43-46.
- [24] 王永,沈颂华,吕宏丽,等.基于简单电压空间矢量三相逆变器的研究[J].电工技术学报,2005,20(10):25-29.
- [25] 周卫平,吴正国,唐劲松,等.SVPWM的等效算法及SVPWM与SPWM的本质联系[J].中国电机工程学报,2006,26(2):133-137.
- [26] CHUNG D W, KIM J S, SUL S K. Unified voltage modulation technique for real time three phase power conversion [J]. IEEE Trans. on IAS, 1998, 34 (2): 374-380.
- [27] 宋强,刘文华,姜齐荣,等.基于参考电压分解的新型多电平逆变器空间矢量调制方法[J].电力系统自动化,2002,10(25):20-25.
- [28] 刘亚东,黄立培.三电平电压型逆变器空间矢量调制算法的研究[J].电工电能新技术,2002,21(4):15-19.
- [29] 张毅,许月霞.三电平逆变器SVPWM控制算法及其仿真研究[J].通信电源技术,2008,25(2):9-12.
- [30] 李玉梅,马伟明.无差拍控制在串联电力有源滤波器中的应用[J].电力系统自动化,2001,25(8):28-30.
- [31] 游小杰,李永东,VOLOUCH Victor,等.并联型有源电力滤波器在非理想电源电压下的控制[J].中国电机工程学报,2004,24(2):55-60.
- [32] 黄文俊,余晓建,沈永琳.单相并网逆变器的Deadbeat控制[J].电力电子技术,2007,41(2):10-12.

(编辑 吴寿林)