

变速风力发电技术中逆变器调制方法研究

叶满园

(华东交通大学, 江西 南昌 330013)

摘要:随着环境和能源问题的日益严峻,可再生能源的开发,尤其是风力发电技术已被越来越多的国家所重视,而对应用在风力发电系统中的逆变器和调制方法的研究尤为重要。本文针对变速风力发电系统中的逆变器,提出了谐波消除、电流滞环和空间矢量 3 种 PWM 控制策略,并对这 3 种方法进行了具体的分析和比较。仿真和实验结果证明,采用 PWM 调制策略控制风力发电逆变器不仅可以实现灵活、可靠的控制,而且还可以减小谐波含量,从而提高逆变器输出电能质量。

关键词:逆变器;脉宽调制;谐波/电流滞环;空间矢量

中图分类号:TM464

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2006)05-0050-03

Research on VSCF Wind Generation Inverter Modulation Method

YE Man-yuan

(Eastchina Jiaotong University, Nancang 330013, China)

Abstract:Due to the deterioration of the circumstance and the short supply of the energies, more and more attention was paid to the development of the regenerable energies, especially the wind energy. Three strategies of harmonic elimination, current hysteresis and space vector modulation are put forward for controlling the inverter applied in speed-variable wind energy generation system, analysis and comparison are made among them. The simulative and experimental results proved that PWM strategy not only provides flexible and reliable control, but also reduces the harmonic content and thus improves the inverter output power quality.

Key words: inverter; PWM; harmonic / current hysteresis; space vector

1 引言

能源、环境是当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题。因此,对可再生能源的开发利用,特别是对风能的开发利用已受到世界各国的高度重视。本文针对风力发电系统中的逆变器,提出了谐波消除(Harmonic Elimination, HE)^[1]、电流滞环(Current Hysteresis, CH)^[2,3]和空间矢量(Space Vector, SV)^[4,5] 3 种 PWM 控制策略,并对 3 种方法进行了具体的分析和比较,最后还对这 3 种方法进行了仿真和实验研究,结果证明了理论分析的正确性。

2 主电路图

图 1 示出三相 IGBT 逆变器拓扑结构。

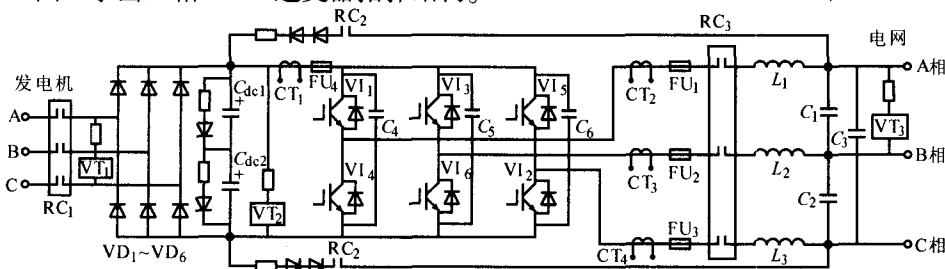


图 1 三相 IGBT 逆变器拓扑结构

图中 CT₁~CT₄——电流传感器 VT₁~VT₃——电压传感器

风力发电系统中的逆变器拓扑结构与电机传动逆变器很相似。不可控整流器由二极管 VD₁~VD₆ 组成,直流侧电容 C_{dc1} 和 C_{dc2} 串联,目的是吸收强风时产生的高电压,VI₁~VI₆ 组成了标准的三相逆变器桥,L₁~L₃ 和 C₁~C₃ 构成了一个三相无源滤波器。快速熔断器 FU₁~FU₄ 起保护作用,RC₁ 和 RC₃ 把逆变器电路与发电机和电网隔离开来。RC₂ 是针对电网连接逆变器设计的,当逆变器以零电压开始运行时,由于并联在 IGBTs 上的二极管的续流作用,立即关断 RC₃ 会导致一反向电流从电网流向直流侧,这样会使二极管损坏。RC₂ 就是为了避免这种情况而设计的。

众所周知,这种逆变器拓扑结构在不采用任何调制技术时,其运行性能并不理想,为了能把电能很好地传递给负载,其源电压必须高于负载电压。但在低风速下,风力发电机的输出电压通常低于电网电压。因此,对于一般逆变器拓扑结构来说,当风速不够大时,能量是不能直接传递给电网的。

定稿日期:2005-06-23

作者简介:叶满园(1978-),男,安徽人,硕士研究生,讲师,研究方向为电力电子技术及应用。

3 PWM 控制策略

采用 PWM 调制策略控制风力发电逆变器不仅可以实现灵活、可靠的控制,而且还可以减小谐波含量,从而提高逆变器输出电能质量。下面分别对 HE、CH 和 SV 三种 PWM 控制策略进行分析。

3.1 谐波消除控制

HE 技术的基本原理是消除难以被滤波器直接滤除的低次谐波,通常存在的低次谐波包括 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波,通过选择触发角就可以消除这些低次谐波。图 2 示出典型 PWM 策略的脉冲序列,该脉冲序列由 5 个脉冲组成,由该脉冲序列产生 AC 相电压。在半个周期内有 $\alpha_1 \sim \alpha_5$ 5 个触发角。

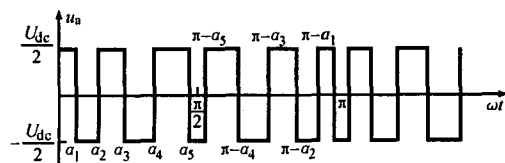


图 2 典型 PWM 策略的脉冲序列

通常有 k 个脉冲的 PWM 脉冲序列可用 Fourier 级数表示为:

$$u_a(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \quad (1)$$

$$\text{式中 } b_n = \frac{4}{n\pi} [1 + 2(-\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2 - \dots + \cos\alpha_k)]$$

$$= \frac{4}{n\pi} \left[1 + \sum_{n=1}^k (-1)^i \cos\alpha_i \right]$$

u_a ——由 PWM 脉冲序列产生的 AC 相电压

b_n ——交流电压 n 次谐波分量的幅值

$$\begin{cases} \frac{4}{\pi} (1 - 2\cos\alpha_1 + 2\cos\alpha_2 - 2\cos\alpha_3 + 2\cos\alpha_4 - 2\cos\alpha_5) - m_a = 0 \\ \frac{4}{5\pi} (1 - 2\cos 5\alpha_1 + 2\cos 5\alpha_2 - 2\cos 5\alpha_3 + 2\cos 5\alpha_4 - 2\cos 5\alpha_5) = 0 \\ \frac{4}{7\pi} (1 - 2\cos 7\alpha_1 + 2\cos 7\alpha_2 - 2\cos 7\alpha_3 + 2\cos 7\alpha_4 - 2\cos 7\alpha_5) = 0 \\ \frac{4}{11\pi} (1 - 2\cos 11\alpha_1 + 2\cos 11\alpha_2 - 2\cos 11\alpha_3 + 2\cos 11\alpha_4 - 2\cos 11\alpha_5) = 0 \\ \frac{4}{13\pi} (1 - 2\cos 13\alpha_1 + 2\cos 13\alpha_2 - 2\cos 13\alpha_3 + 2\cos 13\alpha_4 - 2\cos 13\alpha_5) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

调制度 m_a 表示基频分量系数,它可以根据所需要的逆变器输出电压来确定。通过对式(2)求解,得到 $\alpha_1 \sim \alpha_5$, 从而可以使 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波均为零。由于式(2)的求解很困难,所以 HE 技术一般不能用于实时控制,而只能采用计算机离线迭代求出相应开关角度的数值,并存入微机内存,供控制时查询调用。

3.2 电流滞环(CH)控制

图 3 示出电流滞环(CH)控制原理。其原理是通过控制逆变器输出电流,使其在与给定参考值偏差

保持在 $-h \sim +h$ 范围之内作锯齿状变化。当给定电流为正弦波时,输出电流也十分接近正弦波。CH 控制的精度与滞环的环宽成反比,同时还受到功率开关器件允许的最大开关频率制约。如果环宽选得较大,虽可降低开关频率,但电流波形失真较严重,谐波成分较大。反之,电流波形虽然较好,却会使开关频率增大,有时还可能引起电流超调,反而会增大跟踪误差。所以,正确选择环宽至关重要。

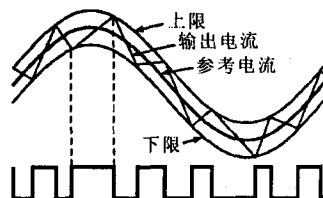


图 3 电流滞环原理

3.3 空间矢量(SV)控制

SV 控制技术可使逆变器输出电流谐波失真非常小,从而得到更高的电能质量。其原理是将逆变器和异步电机视为一体,按照跟踪圆形旋转磁场来控制 PWM 电压,其中磁链的轨迹是靠电压空间矢量相加得到的。图 4 示出逆变器的简化模型。

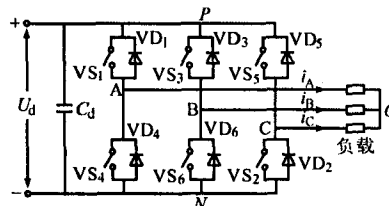


图 4 SV 控制的逆变器模型

在空间矢量控制中共有 8 个状态,其中 6 个是有效状态,两个是零状态。表 1 示出不同状态时的空间矢量控制特性。

表 1 空间矢量、开关状态和导通的开关

| 空间矢量 | 开关状态 | 导通器件 | 矢量定义 |
|------|-------|-----------------|------------------------------|
| 零矢量 | PPP | S_1, S_3, S_5 | $U_0 = 0$ |
| | OOO | S_4, S_6, S_2 | |
| 有效矢量 | U_1 | POO | $U_1 = 2U_d e^{j0} / 3$ |
| | U_2 | PPO | $U_2 = 2U_d e^{j\pi/3} / 3$ |
| | U_3 | OPO | $U_3 = 2U_d e^{j2\pi/3} / 3$ |
| | U_4 | OPP | $U_4 = 2U_d e^{j3\pi/3} / 3$ |
| | U_5 | OOP | $U_5 = 2U_d e^{j4\pi/3} / 3$ |
| | U_6 | POP | $U_6 = 2U_d e^{j5\pi/3} / 3$ |

图 5 示出两平三相逆变器的空间电压矢量图。电压空间矢量在每一个小区间都以零电压矢量开始和结束,并且每次切换都只牵涉到一个功率开关器

件,因此开关损耗较小。

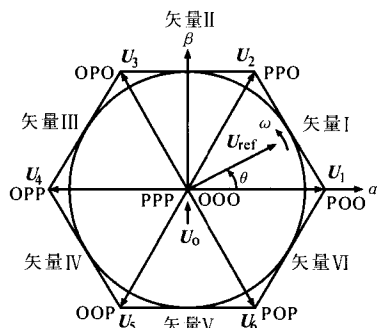


图 5 两电平三相逆变器的空间矢量图

4 仿真研究

本文采用 100kVA IGBT 风机逆变器进行仿真和实验研究。图 6 给出了采用 Matlab/Simulink 对上述 3 种控制方法的仿真结果。图 6a 给出了采用 HE 控制技术的仿真结果,通过对图 6a 的 FFT 分析可得,采用 HE 控制技术消除了 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波,而 17 次谐波成为了所剩高次谐波的主要部分。

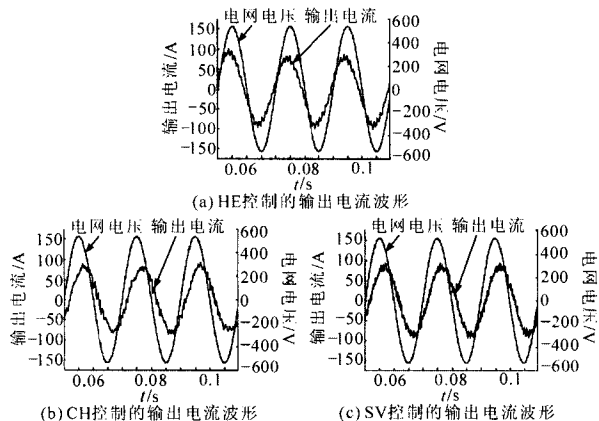


图 6 仿真波形

图 6b 和图 6c 分别采用 CH 和 SV 控制技术的仿真结果。通过对上述 3 种输出电流波形的测量,可以计算出 3 种控制方法的谐波含量 THD, 其中 HE 的 THD=8.9%, CH 的 THD=7.7%, SV 的 THD=5.0%。可见,采用 SV 控制技术产生的 THD 最低。

5 实验研究

实验风机采用容量为 100kVA 带逆变器的 LagerweyLW18/80 型风机,其特性参数为:桨叶直径 18m, 风机转速 50~120r/min, 额定功率 80kW, 额定风速 12.5m/s; 发电机采用异步电机, 电压 230/400V, 电网连接 AC/DC/AC 逆变器系统。图 7a 示出

三相电压为 380V, 电网频率为 50Hz, 输出功率为 46.5kW 采用 CH 控制时的实验波形; 图 7b 示出三相电压为 380V, 电网频率为 50Hz, 输出功率为 34.3kW 采用 SV 控制时实验波形, 比较两图可见, 在相同的功率等级下, SV 控制与 CH 相比 THD 更小。由于 HE 控制仅仅适用在低功率时的柴油发电机, 这里未给出其实验波形。

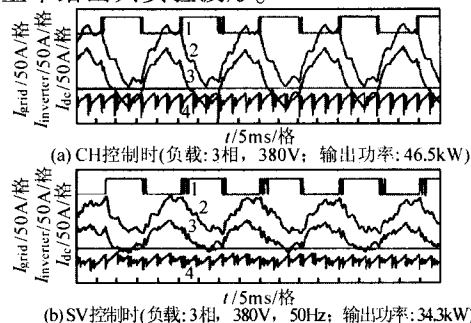


图 7 分别采用 CH 和 SV 控制时的逆变器实验波形

图中 1—A 相触发脉冲 2— I_{grid}
3— $I_{inverter}$ 4— I_{ik}

6 结论

对 3 种 PWM 控制策略进行了描述和比较, 对于 HE 控制而言, 逆变器输出电压只要产生一个小的相位误差或幅值误差就会使输出电流产生一个很大的误差, 因此 HE 控制对于像电网这样的有源负载, 其安全性是最低的。CH 策略因引入了电流误差反馈信号, 从而使输出电流接近于正弦波。CH 方法还能提供功率因数校正环节; SV 方法通过对 IGBT 开关状态的选择可得到最小的电流变化, 从而减小了输出电流谐波成分, 提高了输出电能的质量。

参考文献

- [1] Gary L Johnson. Wind Energy Systems[M]. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.07632, 1993.
- [2] Muhammad H Rashid. Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications [M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1993.
- [3] B K Bose. Power Electronics and AC Drivers[M]. Prentice-Hall, New Jersey, 1986.
- [4] Kjeld Thorborg. Power Electronics—in Theory and Practice [M]. Prentice Hall, UK, 1993.
- [5] Edited by Bimal K Bose. Power Electronics and Variable Frequency Drives: Technology and Applications [M]. IEEE Press Inc., New York, NY 10017-2394, 1997.

欢迎访问我们的网站

www.dldzjs.com