



PWM 逆变器的定向矢量控制策略

许胜辉

(武汉职业技术学院 电信工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 针对风力发电并网的优化问题。提出了三相电压源脉冲宽度调制(PWM)逆变器的定向矢量控制技术,并设计了数字控制的变换器-逆变器系统。给出了该变换器和逆变器的数学模型。提出了一种定向矢量控制的方案来实现对风能并网的控制策略。为了检验该系统的动态性能,采用 MATLAB7/SIMULINK 程序进行了仿真。仿真结果表明,提出的控制系统模型在不同的干扰下都展现出其良好的性能。

关键词: 自激式异步发电机(SEIG);定向矢量控制(VOC);电压源逆变器(VSI);风能转换系统(WECS)

中图分类号: TM7;TM615

文献标识码: A

文章编号: 1671-931X (2013) 01-0084-06

84

引言

风力发电机组的变速运行在各种文献^[1-4]中均记载有许多优势。由于异步电机有许多有利的特性,如较强的鲁棒性、可靠性和低成本,可用作电动机或发电机。由于不需要外部电源来产生励磁磁场,自激式异步发电机^[5-7](SEIG)是用作风力发电的很好的选择,尤其是在偏远的地区。三相电压源 AC/DC/AC (PWM)变换器^[8-10]已越来越多的用于各种应用中,如不间断电源(UPS)系统、升压变换器和风能转换系统。

文中提出的三相电压源 PWM 逆变器的定向矢量控制策略采用 d-q 坐标系。并给出了变换器在不同坐标系(包括同步坐标系)的数学模型。最后给出了逆变器(VSI)分别与 L 滤波器和 LC 滤波器并网的仿真实验结果。

一、系统建模

(一)定向矢量控制 PWM 变换器的建模

图 1 所示为一个 PWM 电压源变换器的主电路和单相等值电路。假设输出端连接一个阻性负载 R_L 。

其中(R, L)是发电机和变换器之间的线路电感。 (e_a) 是发电机相电压, (v_a) 是根据要求的 DC 电压等级控制的桥式变换器电压, (i_a) 是线路电压, (i_{dc}) 是变换器输出电压, (v_{dc}) 是变换器 DC 输出控制电压, (i_c) 是直流母线电容器电流。 (R_L) 是负载电阻, (i_L) 是负载电流。

据图 1(b)所示的等值电路,假设发电机电压是三相平衡的,可得状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} e_a(t) \\ e_b(t) \\ e_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \sin \omega t \\ E \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ E \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 E 为发电机交流电压的最大峰值。

由图 1(b)可知,三相变换器输入端的动态方程可写作:

$$e_{alc}(t) - v_{alc}(t) = L \frac{di_{alc}(t)}{dt} + R i_{alc}(t) \quad (2)$$

由图 1(c)可知,三相变换器输出端的动态方程

收稿日期:2012-11-01

作者简介:许胜辉(1966-),男,湖北武汉人,硕士,武汉职业技术学院副教授,研究方向:自动控制技术。

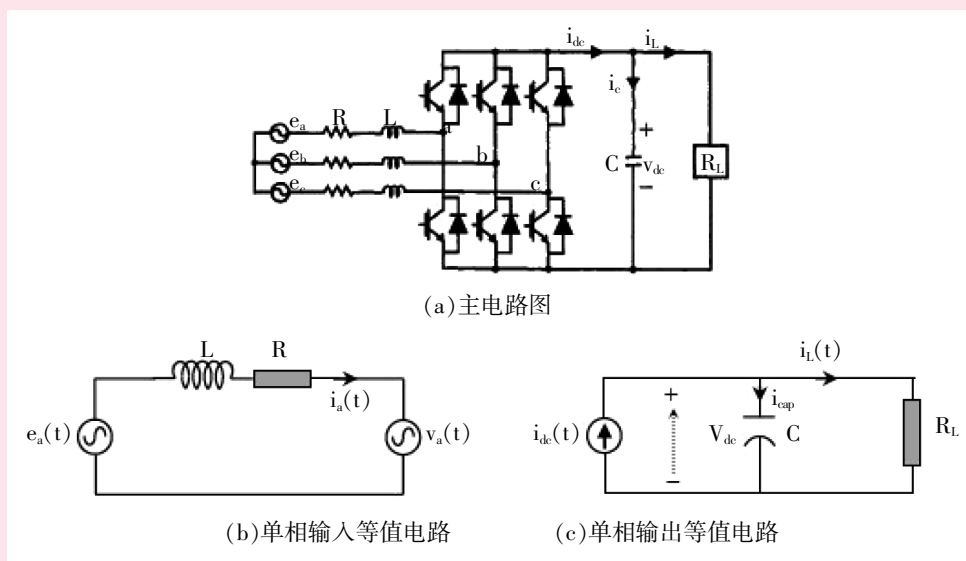


图 1 AC/DC PWM 逆变器电路图

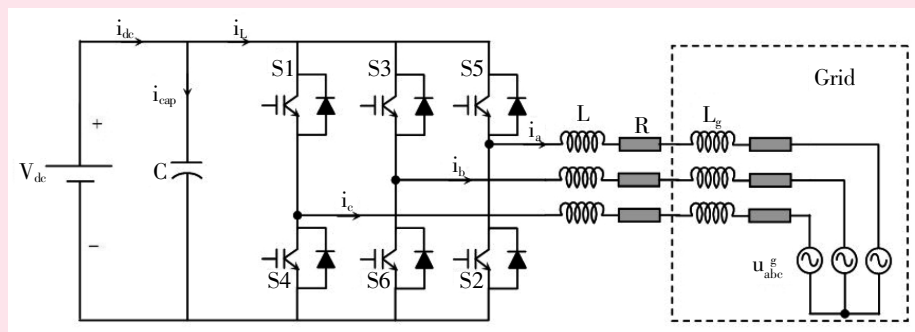


图 2 并网逆变器(VSI)的主电路

可写作:

$$i_c(t) = i_{dc}(t) - i_L(t) = C \frac{dv_{dc}(t)}{dt} \quad (3)$$

线电压、相电流和 PWM 变换器的端电压可以通过变换矩阵 $H(\theta)$ 变换至一个同步参照系下:

$$v_{abc}(t) = H(\theta) \cdot v_{dq}(t)$$

$$v_{dq}(t) = H^{-1}(\theta) \cdot v_{abc}(t) \quad (4)$$

$$H^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \frac{1}{\sqrt{3}}\sin\theta & \frac{-1}{\sqrt{3}}\sin\theta \\ \sin\theta & \frac{-1}{\sqrt{3}}\cos\theta & \frac{1}{\sqrt{3}}\cos\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 θ 是变换的旋转角。

现在,动态方程(2)可以直接从 abc 坐标变换至同步参照系中,得出同步旋转坐标系下的 PWM 变换器的数学模型。

$$e_{dq}(t) - v_{dq}(t) = Ri_{dq}(t) + L \frac{di_{dq}(t)}{dt} - L\omega Mi_{dq}(t) \quad (6)$$

$$\text{其中 } M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

为了简化,假设三相电压源平衡,无零序分量,因此,式(6)还可写成:

$$v_d(t) = e_d(t) - L \frac{di_d(t)}{dt} - Ri_d(t) + L\omega i_q(t)$$

$$v_q(t) = e_q(t) - L \frac{di_q(t)}{dt} - Ri_q(t) + L\omega i_d(t) \quad (7)$$

S 域的变换器系统可通过直接对同步系中的动态方程进行拉普拉斯变换来得到:

$$i_d(s) = \frac{1}{LS+R} [e_d(s) - v_d(t) + \omega Li_q(s)]$$

$$i_q(s) = \frac{1}{LS+R} [e_q(s) - v_q(t) + \omega Li_d(s)] \quad (8)$$

对于变换器输出侧:

$$v_{dc} = \frac{R_L}{1+CR_Ls} \cdot i_{dc} \quad (9)$$

(二)定向矢量控制 PWM 变换器

逆变器(VSI)连接三相公共电网的主电路如图 2 所示。电感 L 作为滤波器安装在电网和逆变器(VSI)之间,内部电阻为 R。逆变器(VSI)的相电位记为 $V_a(t)$, $V_b(t)$ 和 $V_c(t)$ 。电网的相电位记为 $u_a^g(t)$, $u_b^g(t)$ 和 $u_c^g(t)$ 。

(t) 和 $u_g^g(t)$ 。从直流母线流向逆变器(VSI)的电流记为 $i_a(t)$, $i_b(t)$ 和 $i_c(t)$, 直流母线上的电流和电压分别记为 $i_{dc}(t)$ 和 $v_{dc}(t)$ 。

要设计一个逆变器(VSI)控制系统, 数学模型很重要, 它可用来预测系统的动态性能、不同控制极小值和系统参数下的稳定限制。假设图 2 中电网电感 (L_g) 为零。

假设电网平衡, 可得如下的状态方程:

$$\begin{bmatrix} u_a^g(t) \\ u_b^g(t) \\ u_c^g(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \cdot \sin \omega_g t \\ U \cdot \sin(\omega_g t - 2\pi/3) \\ U \cdot \sin(\omega_g t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 ω_g 是电网电压矢量的角频率。

逆变系统的交流侧可以表示为如下的微分方程:

$$L \frac{di_{abc}(t)}{dt} + Ri_{abc}(t) = v_{abc}(t) - u_{abc}^g(t) \quad (11)$$

采用矢量表示时, 前一个方程还可以在静止坐标系里写作:

$$L \frac{di_{\alpha\beta}(t)}{dt} + Ri_{\alpha\beta}(t) = v_{\alpha\beta}(t) - u_{\alpha\beta}^g(t) \quad (12)$$

方程(12)还可与电网电压同步在旋转坐标系里表示:

$$L \frac{di_{dq}(t)}{dt} + (R + j\omega_g L) i_{dq}(t) = v_{dq}(t) - u_{dq}^g(t) \quad (13)$$

解耦方程可以写成状态空间形式:

$$\frac{dX}{dt} = A \cdot X - B \cdot Y \quad (14)$$

其中状态矢量和输入矢量定义如下:

$$X = [i_d \quad i_q]^T \quad (15)$$

$$Y = [V_d \quad V_q \quad u_d^g \quad u_q^g]^T \quad (16)$$

系统矩阵和输出矩阵分别是:

$$A = \begin{bmatrix} -R/L & \omega_g \\ -\omega_g & -R/L \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/L & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & -1/L \end{bmatrix} \quad (18)$$

系统直流侧可用如下方程表示:

$$C \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = i_{dc}(t) - i_L(t) \quad (19)$$

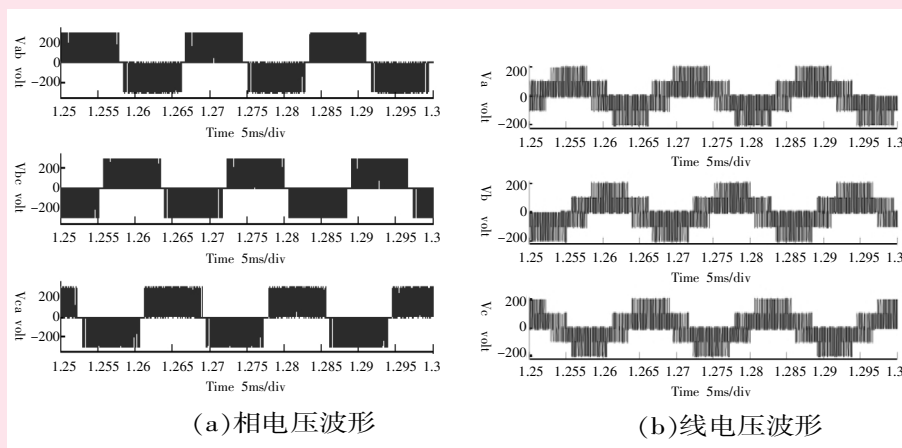


图 3 Abc 坐标下的逆变器(VSI)仿真

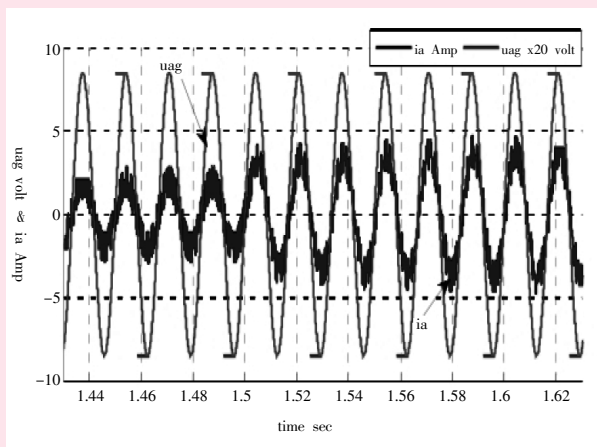


图 4 电网相电压与注入电流仿真波形

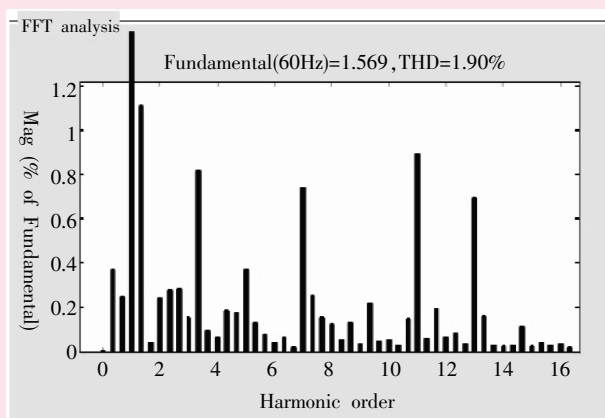


图5 注入电流的谐波频谱

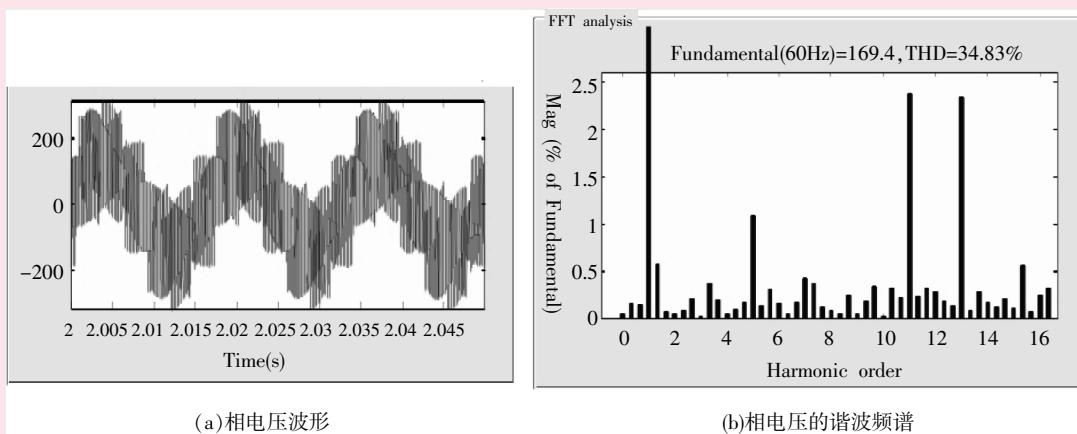


图6 逆变器相电压仿真波形

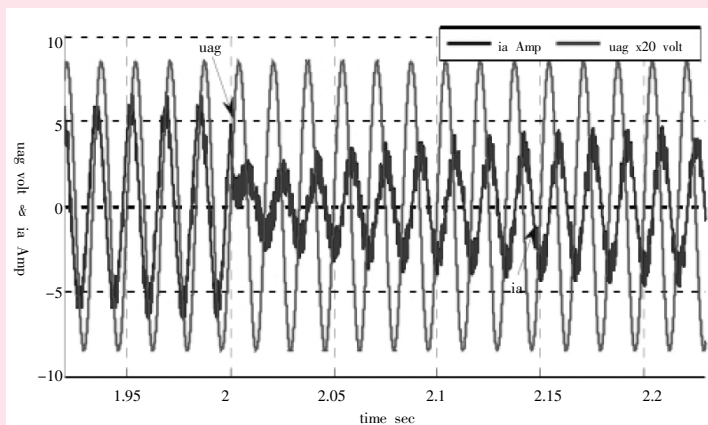


图7 注入电网的无功功率的阶跃响应的仿真结果

二、仿真实验

为了探讨定向矢量控制(VOC)算法并电网的逆变器(VSI)的性能,我们采用了 Simulink 软件进行了仿真。仿真参数为 $f=50\text{Hz}$ 、 $V_{dc}=350\text{V}$ 、 $L_f=24\text{mH}$ 、 $R_f=2\Omega$ 、 $C_f=40\mu\text{F}$, SVPWM 采用 5KHz 的开关频率。两个

内部 PI 控制器用作电流控制器;一个用于 d 元件,另一个用于 q 元件。外部 PI 控制器作为电压控制器。

(一) 带电感滤波器的连网定向矢量控制(VOC)逆变器(VSI)

为了评估并网的电能性质,我们进行了两种测

试。其中一种是注入没有无功补偿的有功功率。另一种是注入含有无功补偿(超前或滞后)的有功功率。

Abc 坐标系下的逆变器(VSI)相电压和线电压分别如图 3(a)、(b)所示。根据风速特性,风速是不断改变的。需保持输出电压与电网同步,电压等级为 218V、50Hz。

图 4 所示为注入功率的测试一。保持无功功率为零,有功功率的阶跃变化如图 4。

由于输入的功率只有有功功率,相电流和电网电压波形如图 4。

利用快速傅里叶变换(FFT)分析注入电流的谐波频谱如图 5 所示。由图 5 可知,采用了 L 滤波后电流谐波成分减少(THD=1.9%)。

有开关谐波的逆变器(VSI)相电压及其谐波频谱如图 6(a)、(b)所示。

由图 6(b)可知,由于逆变器(VSI)的较高开关频率(5KHz),相电压有很大的谐波成分(THD=34.83%)。

测试二研究控制器性能和考虑有功功率和无功功率的系统性能。

$P^*=500W$ ——整个测试期

$Q^*=500VAR$ ——从开始持续 2 秒,然后随后变为正参考($Q^*=-500VAR$)

图 7 的电网电流和电压波形清楚的显示了提供与不提供无功功率的区别。从一开始并持续了 2 秒,逆变器(VSI)作为一个容性负载给电网提供无功功率,这之后逆变器(VSI)从电网吸收无功功率,造成电流滞后于电压。

三、结语

本文给出了三相电压源 PWM 逆变器定向矢量控制系统的动态数学模型。其中,定向矢量控制的并网逆变器实现了高性能的控制操作。通过仿真实验,验证了文中提出的控制方法成功地实现将风能作为有功及无功功率对电网状态进行了补偿,以及对整个系统的有效性和实用性。

参考文献:

- [1] O.A.Mohammed,Fellow,IEEE,Z. Liu,and S.Liu,Senior Member,IEEE.A Novel Sensorless Control Strategy of

Doubly Fed Induction Motor and Its Examination With the Physical Modeling of Machines [J].IEEE Trans.on Magnetics,Vol.41,NO.5,pp.1852-1855,May, 2005.

- [2] Lahcene Quazene and George McPherson.Analysis of The Isolated Induction Generator [J].IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems,Vol.PAS-102,No.8, pp. 2793-2798, August,1983.
- [3] N.H.Malik and S.E.Haque.Steady-state Analysis and Performance of An Isolated Self-Excited Induction Generator [J].IEEE Trans. on Energy Conversion,Vol. EC-1,No.3 pp.134-139, September,1986.
- [4] A.K.Aljabri and A.I.Alolah.Capacitance Requirement for Isolated Self-Excited Induction Generator [J].IEE Proceedings, part B, Vol.137,No.3,pp.154-159,May, 1990.
- [5] L.Shridhar,B. P. Singh and C. S. Jha. A Step Towards Improvements in The Characteristics of Self-Excited Induction Generator [J]. IEEE Trans On Energy Conversion,Vol.8,No.1,pp.40-46,March,1993.
- [6] S.P.Singh,M.P.Jain and Bhim Singh.A New Technique for Analysis of Self-Excited Induction Generator [J]. Electric Machine and Power Systems, Vol. 23, pp. 647-656,1995.
- [7] M. Steinbuch. Optimal multivariable control of a wind turbine with variable speed in Proc. Eur [J]. Wind Energy Conf.,1986, pp. 623-628.
- [8] J.A. M.Bleij, A.W.K.Chung,and J. A. Rudell.Power smoothing and performance improvement of wind turbines with variable speed in Proc [J]. 17th British Wind Energy Assoc.,1995, pp. 353-358.
- [9] S.M. B. Wilmshurst.Control strategies for wind turbines [J].Wind Eng.,vol.12,no.4,pp.236 249,1988.
- [10] D. Seyoum,C. Grantham and M. F. Rahman.The dynamic charteristics of an isolated self-excited induction generator driven by wind turbine [J].IEEE Trans.on Ind.App.,Vol.39,No.4,pp.936-944,July/Aug. 2003.

[责任编辑:刘 骋]

On Vector Oriented Control of Voltage Source PWM Inverter

XU Sheng-hui

(School of Telecommunication Engineering, Wuhan Polytechnic, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper analyzes the design and simulation of vector oriented control of three-phase voltage source pulse-width modulation (PWM) inverter which aims to optimize the utilization of wind power injected into the grid. To realize this goal, a digitally controlled converter-inverter system is proposed which provides economical utilization of the wind generator. In order to examine the dynamic performance of the system, its model is simulated and results are analyzed. The simulation results are given using MATLAB7/SIMULINK program. The results for different disturbance conditions show good performance of this proposed control algorithm.

Key words: self-excited induction generator (SEIG); vector oriented control (VOC); voltage source inverter (VSI); wind energy conversion system (WECS)

(上接第 83 页)

三、结论

目前使用的节能灯的主要照明材料是利用稀有金属制成,由于稀有金属贵重且矿藏极少,国家限制开采,研究高亮度 LED 以取代节能灯是势在必行。由于高亮度 LED 的节能效果十分明显,预计是今后的照明和家庭装饰的主要材料,研究光源的可控性十分有意义。本文结合单片机教学,开发高亮度 LED 照明和家庭装饰产品实属利教、利学、利国、利民之

举。从技术角度,通过程序控制可以达到无级调光的目的,为高亮度 LED 在不同领域应用提供了可靠的控制方法。

参考文献:

- [1] 罗学恒.单片机应用与实践[J].北京:电子工业出版社,2010.

[责任编辑:刘 骋]

Research on Dimming of LED Light with High Brightness

LUO Xue-heng

(School of Computer Science, Wuhan Polytechnic, Wuhan430074, China)

Abstract: LED with high brightness has been widely used in household lamination in recent years. And it is significant to develop stepless dimming technology to cater for the needs of different markets. In this research, a LED dimming system is proposed: Single-chip microcomputer (SCM) is used as the master controller of dimming; high voltage switch transistors are used as driving device; button switch is used to control the brightness of light. Upon picking up orders of adjustment from button switch, the SCM will control width of valid power level by altering the default value of timer and therefore control the brightness of LED light. The paper concludes that the system is economical, easy to operate and can dim steplessly.

Key words: high brightness LED light; single-chip microcomputer; stepless dimming