

新型高压变频器设计

张 亮¹, 陈国栋^{1,2}, 蔡 旭¹

(1. 上海交通大学 风力发电研究中心, 上海 200240; 2. 上海输配电股份有限公司, 上海 200240)

摘要: 开发了一款可能量反馈的级联型高压变频器, 其电网侧变换器摒弃了传统的二极管不可控整流器, 而采用三相 PWM 整流器为电机侧级联型逆变器各 H 桥单元提供独立的直流电源, 使得在不引入多脉波整流技术的情况下, 就能够实现单位功率因数的整流和逆变, 且网侧电流呈正弦, 谐波含量小。为验证该结构变频器适合应用于高压大功率交流变频调速领域, 以高压异步电动机为典型负载, 采用基于转子磁链定向的矢量控制策略, 对异步电动机的启动和突加负载特性进行了研究, 并在 Matlab/Simulink 下进行了仿真实验, 实验结果证明了设计的有效性。

关键词: 级联型; 高压变频器; 能量反馈; 矢量控制

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)04-0055-04

开发和推广大容量中、高压变频调速节能装置, 对我国工业生产降低单产能耗具有重大意义^[1]。然而, 与低压变频器相比, 高压变频器在很多方面有着更高的技术要求和难点, 包括变频器的电路拓扑结构选择、电网侧的电能质量、功率开关器件的承受能力、高压电机的高性能控制等诸多方面^[2]。

在比较目前国内外已有高压变频器的基础上, 针对一种新型多电平高压变频器^[3]进行研究和设计, 其主电路采用三相 PWM 整流器代替二极管不控整流单元, 以实现变频器整机的四象限运行。为验证新型高压变频器在大功率交流传动领域的应用, 以高压异步电动机为典型负载, 研究了采用矢量控制策略下的高压异步电动机运行特性, 并在 Matlab/Simulink 下进行了仿真实验, 仿真结果证明了设计的有效性。

1 主电路拓扑结构

开发新型高性能级联型多电平高压变频器, 其主电路拓扑结构如图 1 所示, 此处只给出了两单元级联示意, 更多单元级联情况与此类似, 网侧三相 PWM 整流器也只给出了 A 相、B、C 相也类似。

新型高压变频器结构特点如下:

a. 由于网侧整流单元采用三相 PWM 整流器, 无需多脉波整流技术, 故网侧仅通过普通隔离降压变压器将 10 kV 高压降低至 690 V, 而非使用做工严格的移相变压器;

b. 变频器可以实现四象限运行, 网侧单元能够实现单位功率因数整流和逆变, 其作用是为逆变侧各 H 桥单元提供独立的直流电源, 同时也可按要求输出一定的无功功率;

c. 电机侧逆变单元采用 H 桥级联方式, 使用低

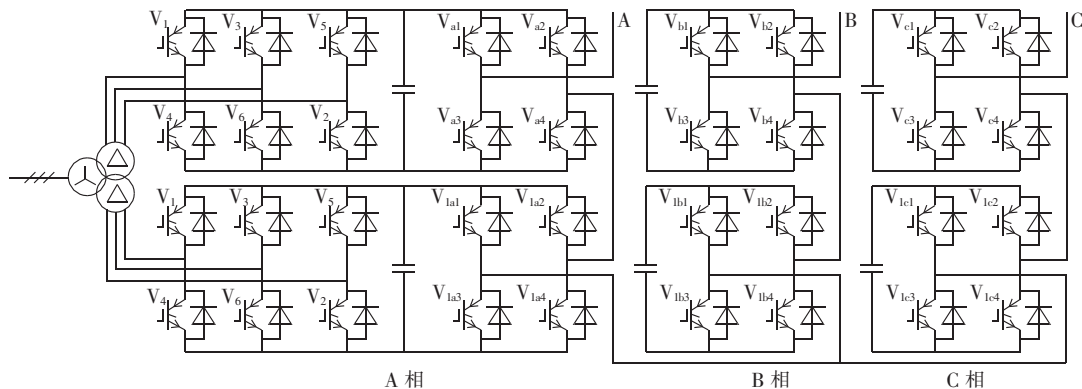


图 1 新型高压变频器主电路拓扑

Fig.1 Topology of high-voltage converter

收稿日期: 2010-05-07; 修回日期: 2011-02-20

基金项目: 2008 年度上海市重大技术装备研制专项 (ZX08030); 上海市科委“科技创新行动计划” (08DZ1200504, 09DZ1201303)

Project supported by the Key Apparatus Design Project of Shanghai Government (ZX08030) and Shanghai Technique Innovative Plan (08DZ1200504, 09DZ1201303)

压器件实现多电平高压输出,采用级联方式,控制技术成熟,保障了装置的可靠运行,结合现代交流电机的高性能控制算法,可实现其在多种场合下应用。

2 工作原理及数学模型

新型高压变频器由多个功率单元组成,各单元结构和原理相同,在建立新型高压变频器的数学模型之前,以一单元为典型代表,从能量平衡的角度出发,深入探究其工作特性。将流过电解电容的电流分解为注入电容电流和抽取电容电流 2 种。为维持直流侧电压的稳定,注入电容电流和抽取电容电流是个动态调节平衡的过程;当电机侧工作在电动状态时,网侧变换器处于整流状态,此时电机侧逆变器从电容抽取电流,网侧变换器向电容注入电流;反之,当电机侧变换器工作在制动状态时,网侧变换器处于逆变状态,此时,网侧变换器从电容抽取电流,电机侧变换器向电容注入电流。其工作原理见图 2(a)(b)。

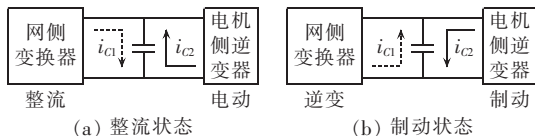


图 2 新型高压变频器的工作原理

Fig.2 Principle of high-voltage converter

注入电容电流和从电容抽出的电流在动态时不相等是直流侧电压波动的原因,故

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{c1} - i_{c2} \quad (1)$$

其中, C 为直流侧电容值; u_{dc} 是直流侧电压值; i_{c1} 由网侧三相 PWM 整流器提供,网侧功率器件的开关状态决定; i_{c2} 由 H 桥单元所带负载引起,与其功率器件开关状态有关。因此要分别建立网侧变换器和电机侧 H 桥单元的开关函数模型。设 s_d, s_q 是网侧 dq 坐标系下的单极性二值逻辑开关函数,取值为 0 或 1; s_L, s_R 是 H 桥单元左、右半桥的单极性二值逻辑开关函数,取值分别为 0 或 1。 u_d, u_q, i_d, i_q 是网侧变换器网电压和输入电流在 d, q 轴上的分量。

网侧变换器流过直流侧电容的电流 i_{c1} 为^[4-5]

$$i_{c1} = \frac{3}{2} (s_d i_d + s_q i_q) \quad (2)$$

i_d, i_q 可通过式(3)计算:

$$\begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} &= u_d - s_d u_{dc} - i_d R \\ L \frac{di_q}{dt} &= u_q - s_q u_{dc} - i_q R \end{aligned} \quad (3)$$

其中, L 为网侧变换器的输入电感值; R 为网侧变换器等效电阻。

电机侧变换器流过直流侧电容的电流 i_{c2} 由电机侧负载电流 i_{load} 及 H 桥单元的开关函数决定,可由式(4)计算:

$$i_{c2} = (s_L - s_R) i_{load} = \begin{cases} i_{load} & s_L = 1, s_R = 0 \\ 0 & s_L = 1, s_R = 1; s_L = 0, s_R = 0 \\ -i_{load} & s_L = 0, s_R = 1 \end{cases} \quad (4)$$

电机侧变换器输出电压 u_o 可由式(5)表示^[6]:

$$u_o = (s_L - s_R) u_{dc} = \begin{cases} u_{dc} & s_L = 1, s_R = 0 \\ 0 & s_L = 1, s_R = 1; s_L = 0, s_R = 0 \\ -u_{dc} & s_L = 0, s_R = 1 \end{cases} \quad (5)$$

综合式(1)~(5)可得新型高压变频器一功率单元在 dq 坐标系下的数学模型,如式(6)所示:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_d - s_d u_{dc} - i_d R \\ L \frac{di_q}{dt} = u_q - s_q u_{dc} - i_q R \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (s_d i_d + s_q i_q) - (s_L - s_R) i_{load} \\ u_o = (s_L - s_R) u_{dc} \end{cases} \quad (6)$$

以上分析了新型高压变频器的工作原理和关联环节,这是进行电网侧变换器和电机侧变换器协同控制的理论基础。

3 异步电机矢量控制

在轧钢、电力牵引等高压大功率应用场合,特别需要对电动机加以高性能的控制,如矢量控制^[7]等。采用坐标变换将交流异步电动机投影到同步旋转坐标系下进行控制,以达到与直流电动机类似的良好控制性能。为此,首先简要介绍高压异步电动机在基于转子磁链定向的 dq 坐标系下的数学模型^[8]。

将 d 轴定向于转子磁链方向,高压异步电动机的定、转子电压方程如下:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r} p i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} p \psi_r - \omega_s \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r} i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r} p i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \omega_s \psi_r + \omega_s \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r} i_{sd} \\ 0 = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sd} + \frac{R_r}{L_r} \psi_r + p \psi_r \\ 0 = \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sq} + (\omega_s - \omega_r) \psi_r \end{cases} \quad (7)$$

其中, u_{sd}, u_{sq} 为定子电压 d, q 轴分量; i_{sd} 和 i_{sq} 为定子电流 d, q 轴分量; R_s 和 R_r 为定、转子绕组等效电阻; L_r, L_s 为 dq 坐标系下定、转子的等效电感; L_m 为定、转子绕组间的等效互感; ψ_r 为转子磁链; ω_s, ω_r 为定、转子的电角速度; p 为微分算子。

转子磁链由 i_{sd} 决定,磁链方程如下:

$$\psi_r = L_m i_{sd} / \left(\frac{R_r}{L_r} p + 1 \right) \quad (8)$$

电磁转矩由 i_{sq} 决定,如式(9)所示:

$$T_e = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) = n_p \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sq} \quad (9)$$

其中, T_e 为电磁转矩; n_p 为电机极对数。

电机运动方程如式(10)所示:

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (10)$$

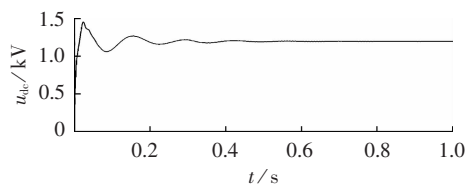


图 8 直流侧电压波形

Fig.8 Waveform of DC link voltage

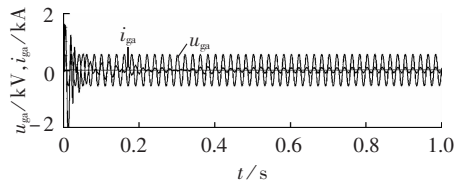


图 9 电网相电压和电流波形

Fig.9 Phase voltage and current at grid side

加到相应的数值,此时,高压变频器输入侧相电压和电流同相,实现了单位功率因数整流,同时电流波形为较好的正弦,畸变率小于使用多脉波整流技术的网侧输入电流。

5 结论

本文以一种新型的高压变频器为研究对象,从能量平衡的角度出发,建立了其数学模型。在此基础上,研究了典型负载高压大功率异步电机的矢量控制,并在 Matlab/Simulink 中进行了系列仿真实验,仿真结果证明了新型高压变频器具有良好的性能,十分适合应用于高压大功率场合。

参考文献:

- [1] 李永东. 大容量多电平变换器:原理、控制、应用[M]. 北京:科学出版社,2005:1-5.
- [2] 吴斌. 大功率变频器及交流传动[M]. 北京:机械工业出版社,2008:1-15.
- [3] RODRIGUEZ J, LAI Jihsheng, PENG Fangzheng. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724-738.
- [4] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2003: 112-115.
- [5] ROCHA R, de SIQUEIRA M F L. A discrete current control for PWM rectifier[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Dubrovnik, Croatia: [s.n.], 2005: 681-686.
- [6] KOURO S, BERNAL R, SILVA C. High performance torque and

flux control for multilevel inverter fed induction motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(6): 2116-2123.

- [7] 高景德, 高衍祥, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 445-490.
- [8] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2004: 190-210.
- [9] MASAHIKO A, KAZUO I, HIDEAKI T, et al. High performance IM drive by coordinate control using a controlled current inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1982, 18(4): 382-392.
- [10] 李晓静, 周书晴. 一种基于 DSP 的变频调速系统的 SVPWM 控制方法[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 43-46.
- LI Xiaojing, ZHOU Shuqing. A SVPWM control method for variable-frequency speed-governing system based on DSP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 43-46.
- [11] MCGRATH B P, HOLMES D G. Multi carrier PWM strategies for multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 858-867.
- [12] 袁志昌, 宋强, 刘文华. 载波移相 SPWM 开关频率的选取[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 37-40.
- YUAN Zhichang, SONG Qiang, LIU Wenhua. Selection of phase-shift SPWM switching frequency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 37-40.
- [13] 刘海波, 毛承雄, 陆继明. 基于多绕组变压器隔离型变换器的链式 STATCOM 研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 5-10.
- LIU Haibo, MAO Chengxiong, LU Jiming. Research of STATCOM based on multi-winding-transformer-isolated converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 5-10.
- [14] 侯世英, 万江, 郑含博. 单相五电平逆变器的多载波 PWM 方法分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(9): 67-72.
- HOU Shiying, WAN Jiang, ZHENG Hanbo. Analysis of multi-carrier PWM methods for single-phase five-level inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(9): 67-72.
- [15] 江友华, 曹以龙, 龚幼民. 基于载波移相角度的级联型多电平变频器输出性能的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 76-85.
- JIANG Youhua, CAO Yilong, GONG Youmin. Research on the cascade multilevel inverter based on different carrier phase-shifted angle[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 76-85.

(编辑: 李育燕)

作者简介:

张亮(1982-), 男, 安徽马鞍山人, 博士研究生, 研究方向为大功率电力电子变换器在风力发电和有源电力滤波器中的应用(E-mail: zhldream@126.com, liangzhldream@sjtu.edu.cn);

陈国栋(1982-), 男, 安徽池州人, 博士研究生, 研究方向为大功率电力电子技术;

蔡旭(1964-), 男, 江苏徐州人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为风力发电相关技术、电网故障处理、大功率电力电子等(E-mail: xucai@sjtu.edu.cn)。

Novel high voltage converter

ZHANG Liang¹, CHEN Guodong^{1,2}, CAI Xu¹

(1. Wind Power Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Electric Power Transmission Company, Shanghai 200240, China)

Abstract: An energy-regenerative cascaded high voltage converter is designed. The three-phase PWM rectifier is used in grid converter, instead of the traditional diode uncontrollable rectifier, to supply isolated DC for each H-bridge of the cascaded inverter at motor side, which makes its rectifier and inverter both operating with unity power factor and the grid-side current totally sinusoidal with few harmonics, though the multi-pulse rectifier technique is not applied. The startup and load sudden increase of high voltage asynchronous induction motor under rotor flux oriented vector control is simulated on Matlab/Simulink platform and results show the designed converter is suitable for HV AC speed adjustment system.

Key words: cascade-type; high voltage converter; energy regeneration; vector control