

基于三电平逆变器的异步电动机直接转矩控制新方法

吴胜兵, 茆美琴

(教育部光伏系统工程研究中心, 合肥工业大学能源研究所, 安徽 合肥 230009)

摘要: 在异步电动机数学模型和三电平空间矢量调制法的基础上, 提出了一种基于三电平逆变器的异步电动机直接转矩控制新方法。新方法将砰-砰控制和开关矢量查表法相结合, 通过最优固定合成矢量的选择, 既有效地抑制了三电平直流侧中点电压不平衡、限制了输出电压变化率 dv/dt 并降低了开关损耗, 又使系统获得了良好的稳态和动态性能。理论分析和仿真结果证明了该控制方法的合理性和可行性。

关键词: 直接转矩控制; 三电平逆变器; 砰-砰控制; 最优固定合成矢量; 中点平衡

中图分类号: TM464; TM921.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2009)02-0022-05

A Novel DTC Algorithm for Induction Motor Based on Three-level Inverter

WU Sheng-bing, MAO Mei-qin

(Research Center for Photovoltaic Engineering System, Ministry of Education PRC.,

Institute of Energy Research, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: It presents a novel direct torque control (DTC) strategy for three-level inverter based on mathematic model of induction motor and three-level space vector modulation. The new control algorithm selects optimal fixed synthesizing vectors using bang-bang control and switching vectors table. The drive system has excellent steady-state and dynamic performance with neutral-point voltage unbalance problem solved, dv/dt of output voltage restrained and switching loss reduced. Analysis and simulation results show the correctness and feasibility of this control scheme.

Key words: DTC; three-level inverter; bang-bang control; optimal fixed synthesizing vector; neutral-point balance

0 引言

直接转矩控制技术无需旋转坐标变换, 转矩和磁场解耦控制方法简单, 系统响应快, 鲁棒性好, 自20世纪80年代中期提出以来, 逐渐成为国内外学者研究的热点^[1-3]。但其绝大多数研究成果都集中在普通的二电平逆变器上, 直到20世纪90年代末期, 研究才开始延伸到三电平逆变器领域。

三电平逆变器的直接转矩控制更具有优势, 因为每个开关管只承受1/2的直流电压、 dv/dt 低、电压和电流的畸变小、功率等级高^[4]。但三电平技术方案有27个空间电

压矢量, 且非零矢量较多, 意味着在实现直接转矩控制时必须解决扇区的有效合理划分和电压矢量的优化选择等新问题。电压矢量如果选择不当, 会引起输出电压的大幅变化和开关损耗及输出电压纹波的增加。中点电压平衡问题在很大程度上也限制了三电平逆变器的广泛应用。若中点电位未能得到有效控制, 则会增加输出电压的谐波含量, 甚至损坏直流侧电容器和开关器件^[5]。

本文提出了一种基于三电平逆变器的异步电动机直接转矩控制新方法, 通过合成矢量的优化选择, 保证了三电平逆变器中点电位的平衡, 同时降低了开关损耗, 改善了交流传动系统的稳态和动态性能。

1 异步电动机在二相静止坐标系上的数学模型

异步电动机的动态数学模型是一个高阶、非线性、

收稿日期: 2009-01-04

作者简介: 吴胜兵(1983-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为电力电子变流技术、中大功率交流传动技术。

基金项目: 教育部科学技术研究重大项目(306004)

强耦合的多变量系统。根据矢量坐标变换理论,异步电动机在 $\alpha - \beta$ 坐标系上的数学模型可用式(1)~式(4)来描述^[6]。

电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \\ u_{\alpha r} \\ u_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & L_m p \\ L_m p & \omega L_m & R_r + L_r p & \omega L_r \\ -\omega L_m & L_m p & -\omega L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_{\alpha s} \\ \psi_{\beta s} \\ \psi_{\alpha r} \\ \psi_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (2)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = n_p L_m (i_{\beta s} i_{\alpha r} - i_{\alpha s} i_{\beta r}) \quad (3)$$

运动方程:

$$T_e = T_L + \frac{J}{n_p} \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中: $u_{\alpha s}$ 、 $u_{\beta s}$ —— $\alpha - \beta$ 坐标系下等效两相绕组定子电压; $u_{\alpha r}$ 、 $u_{\beta r}$ —— $\alpha - \beta$ 坐标系下等效两相绕组转子电压; $i_{\alpha s}$ 、 $i_{\beta s}$ ——等效两相绕组定子电流; $i_{\alpha r}$ 、 $i_{\beta r}$ ——等效两相绕组转子电流; $\psi_{\alpha s}$ 、 $\psi_{\beta s}$ ——等效两相绕组定子磁链; $\psi_{\alpha r}$ 、 $\psi_{\beta r}$ ——等效两相绕组转子磁链; L_m —— $\alpha - \beta$ 坐标系下定子与转子同轴等效绕组间的互感; L_s ——定子等效绕组自感; L_r ——转子等效绕组自感; R_s ——定子绕组电阻; R_r ——转子绕组电阻; ω ——转子角速度; p ——微分算子; T_e ——电磁转矩; T_L ——负载转矩; n_p ——极对数; J ——转动惯量。

2 三电平逆变器的空间电压矢量

三电平空间电压矢量脉宽调制(SVPWM)法最大优点在于概念清晰、电压利用率高、易于数字实现。三电平中点箝位型电压源逆变器主电路如图1所示,逆变器的输出相电压有3种: $+U_{dc}/2$ 、0和 $-U_{dc}/2$ (分别记为P、O和N)。逆变器输出的27种基本矢量构成了三电平逆变器的空间电压矢量图(图2)。根据电压矢量幅值大小,将矢量分为4类:6个大矢量(如PNN、PPN)、6个中矢量(如PON、OPN)、12个小矢量(如POO、ONN)和3个零矢量(OOO, PPP, NNN)^[7]。其中,正、负小矢量对输出电压的作用是相同的,但对中点电压的作用正好相反,于是产生了中点电压平衡问题。

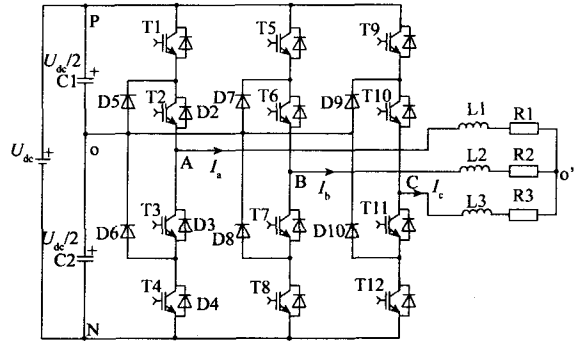


图1 三电平中点箝位型电压源逆变器主电路

Fig. 1 Topology of three-level NPC voltage source inverter

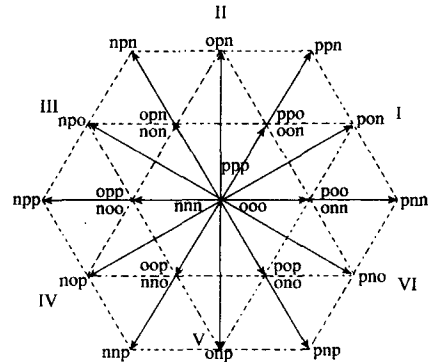


图2 三电平逆变器的空间电压矢量图

Fig. 2 Space voltage vector diagram of three-level inverter

3 异步电动机直接转矩控制新方法

3.1 异步电动机直接转矩控制原理

和传统的磁场定向矢量控制不同,直接转矩控制是通过查表的方法选择一个最优矢量,把转矩作为被控量,从而实现对转矩的直接控制。异步电动机产生的电磁转矩可用式(5)表示:

$$T_e = \frac{3n_p L_m}{2\sigma L_s L_r} \psi_s \psi_r \sin \theta \quad (5)$$

式中: σ ——漏感系数; ψ_s ——定子磁链; ψ_r ——转子磁链; θ ——转矩角,即 ψ_s 和 ψ_r 的夹角。

由式(5)可知, θ 可以直接影响 T_e 。由于转子时间常数很大,在很短的采样周期内,定子电压矢量的变化对转子磁链 ψ_r 的影响可以忽略不计,那么直接转矩控制主要的控制变量是定子磁链矢量。

为了实现无速度传感器控制,采用基于定子电压和电流的改进型磁链观测模型,对定子磁链进行估算^[8,9]。在静止坐标系下,定子磁链可以表达为:

$$\psi_s = \psi_{\alpha s} + j\psi_{\beta s} = \int (u_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt + j \int (u_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \quad (6)$$

式中: $u_{\alpha s}$ 、 $u_{\beta s}$ ——直接测量的定子电压; $i_{\alpha s}$ 、 $i_{\beta s}$ ——直接测量的定子电流。

其幅值和角度为：

$$\left. \begin{aligned} \psi_s &= \sqrt{\psi_{\alpha s}^2 + \psi_{\beta s}^2} \\ \theta_s &= \arctan\left(\frac{\psi_{\beta s}}{\psi_{\alpha s}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

相应的电磁转矩可以由式(8)计算得到。可见，定子给定磁链和对应的电磁转矩可以用定子电压和电流的测量值直接计算得到：

$$T_e = n_p(i_{\beta s}\psi_{\alpha s} - i_{\alpha s}\psi_{\beta s}) \quad (8)$$

三电平直接转矩控制系统(图3)包括速度控制环、转矩和磁链控制环。以速度控制环的输出作为给定转矩，用转矩控制环来实现对给定转矩 T_e^* 的快速跟踪；磁链控制环则使电机定子磁链维持在给定值 ψ_s^* 所允许的容差范围内，通过对定子磁链和电磁转矩进行独立控制从而获得很好的动态性能。根据转矩比较器和磁链比较器的输出以及扇区S信号，开关逻辑单元选择合适的逆变器电压矢量(开关状态)。

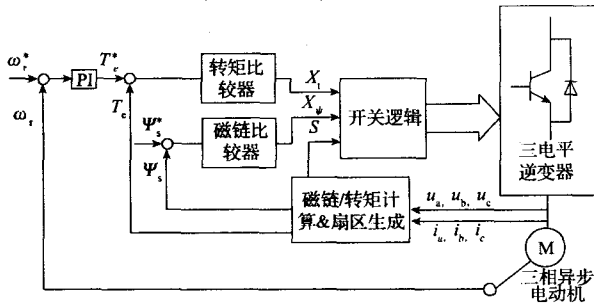


图3 三电平直接转矩控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of DTC system for three-level inverter

3.2 最优开关矢量的选取

为防止电压幅值跳变过高、中点电位偏移超限和转矩偏差过大，三电平异步电动机调速系统须选择最优化的电压矢量^[10]。文献[10]提出的“24矢量法”能较好地解决磁链和转矩脉动问题，但其滞环比较器和开关表的结构相对复杂，在算法实现过程中控制器运算工作繁重。遵循合成矢量基本选取原则^[11]，将中点平衡的砰-砰控制法^[12]和开关矢量查表法相结合，通过最优合成矢量的选择，本文提出了一种“12矢量”新控制方法。该方法算法简单，采用单片微处理器就能很容易地实现；同时还将平衡中点、抑制输出电压突变和减小转矩脉动较好地整合在一起，实现了调速系统高效、可靠运行。本文提出的优化合成矢量如表1所示，其合成方案见表2。

表1 新型优化合成矢量选择

Tab. 1 Selection of new optimal synthesizing vector

扇区	合成矢量			
	增加转矩、 增加磁链	增加转矩、 减小磁链	减小转矩、 增加磁链	减小转矩、 减小磁链
1	V ₂	V ₅	V ₁₂	V ₉
2	V ₃	V ₆	V ₁	V ₁₀
3	V ₄	V ₇	V ₂	V ₁₁
4	V ₅	V ₈	V ₃	V ₁₂
5	V ₆	V ₉	V ₄	V ₁
6	V ₇	V ₁₀	V ₅	V ₂
7	V ₈	V ₁₁	V ₆	V ₃
8	V ₉	V ₁₂	V ₇	V ₄
9	V ₁₀	V ₁	V ₈	V ₅
10	V ₁₁	V ₂	V ₉	V ₆
11	V ₁₂	V ₃	V ₁₀	V ₇
12	V ₁	V ₄	V ₁₁	V ₈

表2 最优合成矢量开关状态表

Tab. 2 Switching sequence of optimal synthesizing vectors

合成矢量	开关状态 / 作用时间百分比(%)			
V1	000/10、	POO/20、	PNN/50、	ONN/20
V2	000/10、	ONN/30、	PON/30、	PPO/30
V3	000/10、	OON/20、	PPN/50、	PPO/20
V4	000/10、	PPO/30、	OPN/30、	NON/30
V5	000/10、	OPO/20、	NPN/50、	NON/20
V6	000/10、	NON/30、	NPO/30、	OPP/30
V7	000/10、	NOO/20、	NPP/50、	OPP/20
V8	000/10、	OPP/30、	NOP/30、	NNO/30
V9	000/10、	OOP/20、	NNP/50、	NNO/20
V10	000/10、	NNO/30、	ONP/30、	POP/30
V11	000/10、	ONO/20、	PNP/50、	POP/20
V12	000/10、	POP/30、	PNO/30、	ONN/30

根据直接转矩控制原理和优化合成矢量(表1)设计出“12矢量”法的滞环比较器及开关表，其中定子磁链幅值和转矩均采用2级滞环比较器。以第一扇区为例说明开关表(表3)。当实际转矩和磁链低于给定值时，选择合成矢量 V_2 以增加转矩和磁链；当实际转矩低于给定值而磁链高于给定值时，选择合成矢量 V_5 以增加转矩并减少磁链，将其跟踪误差控制在滞环宽度内。同样，在其他扇区，当转矩、磁链过高或过低时，都可选择相应的合成矢量以调节转矩和磁链。由此可见，可利用在砰-砰控制下的开关表来选择适当的合成矢量对系统的转矩和磁链进行滞环控制。

表3 砰-砰控制下第一扇区开关表

Tab. 3 Switching table of the first sector in bang-bang mode

转矩比较器输出	磁链比较器输出	合成矢量选择
1	1	V ₉
1	-1	V ₁₂
-1	1	V ₅
-1	-1	V ₂

采用表2所示的矢量合成方法可对中点电位平衡进行实时控制。当 j 为奇数时,合成矢量 $V_j(j=1 \sim 12)$ 由1个大矢量和2个小矢量组合而成。以合成矢量 V_3 为例,它由大矢量PPN和2个小矢量OON、PPO组合而成。对于大矢量PPN,由于三相异步电动机未连接到中点,中点未参与能量的传输,所以不会对中点电位产生影响;而2个小矢量OON、PPO成对出现,它们引入中点的电流方向相反,对中点电压的作用正好相反,所以在合成时让两者的作用时间占空比各为20%,避免了中点电压的累积误差。当 j 为偶数时, V_j 由中矢量和相邻的2个小矢量组合而成。此外,合成矢量 V_j 与 V_{j+6} 所选的中矢量和小矢量的作用时间均相同。这样,中矢量对中点电位的作用既可通过与之作用相反的小矢量来抵消;同时,由于合成矢量 V_j 与 V_{j+6} 引入中点的电流顺序相同,对应的平均中点电流则为零。假定采样周期足够短,那么中点电压在这个采样结束后就回到了初始状态。由此可见,此方法有效地抑制了中点电压的大幅度动态波动和漂移,同时也大大简化了三电平电路复杂的矢量选择问题。

4 仿真

为验证本文提出的基于合成矢量表的三电平直接转矩控制新方法的有效性,利用Matlab/Simulink搭建了转速外环、转矩和磁链内环的仿真模型进行仿真。仿真时,以三相异步电动机(表4)为负载,采样频率为10 kHz,直流侧母线电压为600 V,定子磁链幅值给定值为1.2 Wb。电动机空载启动时,给定转速 $\omega = 400$ r/min;在 $t=0.3$ s时刻,给定负载转矩突增至 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$;在 $t=0.5$ s时刻,给定负载转矩突增至 $13 \text{ N}\cdot\text{m}$;在 $t=0.7$ s时刻,将转速突增至800 r/min。系统仿真波形如图4所示。

表4 仿真用异步电动机参数

Tab. 4 Parameters of induction motor for simulation

名称	数值	名称	数值
额定功率/kW	2	定子电阻/ Ω	2.9
额定电压/V	380	转子电阻/ Ω	2.42
额定转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	1 450	定子自感/mH	385.6
极对数	2	转子自感/mH	385.6
转动惯量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.035	定转子互感/mH	373.8

从图4(a)可以看出:电机启动时,定子磁场快速建立,保证电机具有足够的启动转矩;之后,定子磁链幅值几乎恒定,不受转矩的影响,实现了定子磁链对转矩的解耦控制。图4(b)表明负载转矩突变时,转矩能迅速地跟踪指令,且稳态工作时脉动很小。由图4(c)和图4(d)可以看出,系统速度响应快,稳态时运行平稳定子电流随电磁转矩相应变化且谐波失真小,表明系统具有良好

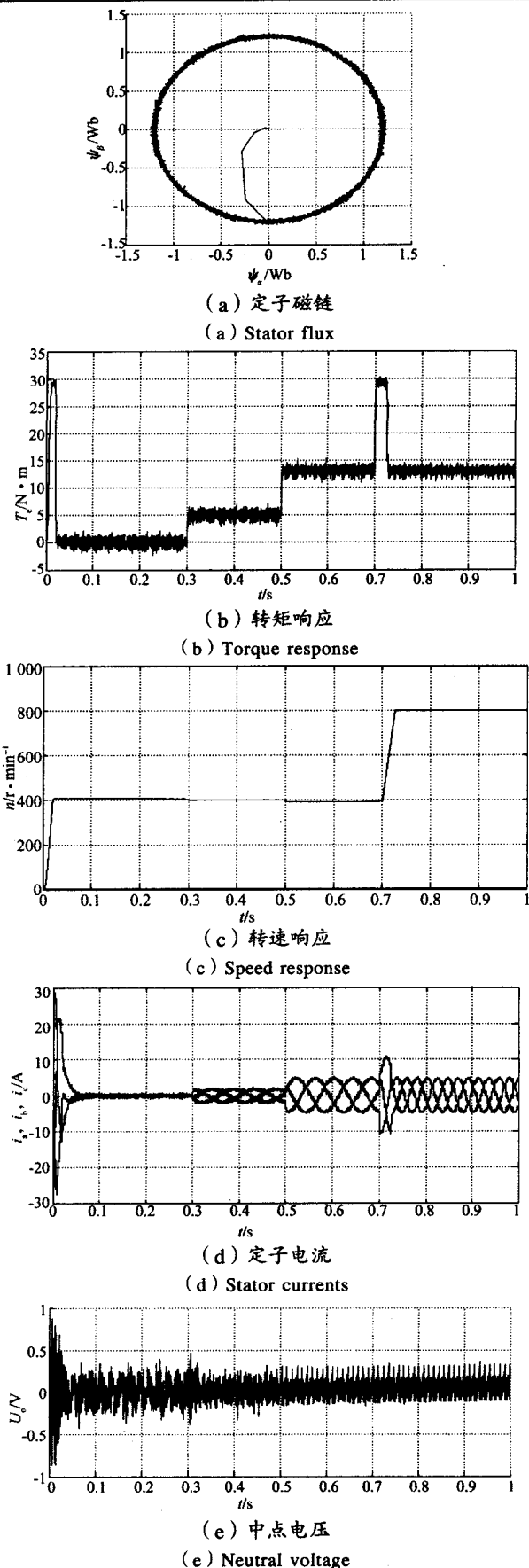


图4 基于新型合成矢量算法的直接转矩控制系统仿真波形
Fig. 4 Simulation results of DTC system based on a novel synthesizing vector algorithm

的调速性能和稳态性能。由图4(e)可看出:中点电压的波动受到了极大的抑制,相对于直流母线电压,其波动值完全可以忽略不计,有效地解决了中点平衡问题。

5 结语

本文以二极管中点箝位型三电平逆变器供电的异步电动机高性能调速系统为基础,提出了一种基于最优合成矢量表的三电平直接转矩控制新方法。该方法控制简单,在一定程度上降低了系统成本,有效抑制了直流侧中点电压的不平衡,保证了异步电动机调速系统具有良好的调速性能。

参考文献:

- [1] Takahashi I, Nogushi T. A New Quick-response and High-efficiency Control Strategy of Induction Motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1986, 22(5): 820-827.
- [2] Telford D, Dunnigan M W, Williams B W. A Comparison of Vector Control and Direct Torque Control of an Induction Machine[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2000:421-426.
- [3] 李永东,肖曦,高跃.大容量多电平变换器-原理·控制·应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [4] Messaif I, Berkouk E M, Saadia N. Ripple Reduction in DTC Drives

by Using a Three-Level NPC VSI[C].CECS 2007 -14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Marrakech, Morocco, 2007: 1179-1182.

- [5] Gharakhani A, Radan A. Analytical Study of Affecting Characteristic of Voltage Vectors of a Three-level NPC Inverter on Torque and Flux of DTC Controlled Drives[C].Proceedings of 2007 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Antalya, Turkey, 2007: 754-759.
- [6] 陈伯时.电力拖动自动控制系统-运动控制系统[M].第3版.北京:机械工业出版社,2003.
- [7] 何湘宁,陈阿莲.多电平变换器的理论和应用研究[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [8] Zaimedidine R, Berkouk E M, Refoufi L, et al. A Scheme of EDTC Control Using a Three-level Voltage Source Inverter for an Induction Motor[C]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, Spain, 2007.
- [9] 刘军锋,李叶松,万淑芸.基于U-I模型的感应电机定子磁链观测方法研究[J].电气传动,2008,38(4):20-24.
- [10] 林磊,邹云屏,钟和清,等.基于固定合成矢量的三电平异步电机直接转矩控制[J].中国电机工程学报,2008,28(27):120-125.
- [11] 王建渊,蔡剑,钟彦儒.一种新的合成矢量三电平PWM方法仿真研究[J].系统仿真学报,2008,20(1):147-155.
- [12] 林磊,邹云屏,王展,等.一种具有中点平衡功能的三电平异步电机直接转矩控制方法[J].中国电机工程学报,2007,27(3):46-50.

(上接第4页)电流的1.8倍左右,不高于额定电流的2倍,直流侧电压 V_{DC} 基本没有波动,各量值都在设备允许值范围内,可以保证电机以及变频设备的运行安全,且故障后0.1s内系统恢复稳定输出。

4 结语

与传统的双馈感应电机控制系统相比,采用考虑电网电压波动建立的双馈电机转子侧变换器控制系统数学模型以及定子电压定向的空间矢量方法对发电机转速和定子侧输出的无功功率进行解耦跟踪控制,在电网稳定运行期间具有很好的控制效果,电网电压下降到额定电压的60%以上时,可以使系统变量都运行在设备允许范围之内,不会危及到电机和变频器的运行安全,且系统在故障后0.1s内恢复稳定运行。也就是说,采用该套控制系统,能有效地控制电网电压跌落时的转子电流和变换器直流电压,在电网电压下降到额定电压的60%以上时,不用增加额外的硬件设备就可以实现低电压穿越运行。

参考文献:

- [1] 廖勇,杨顺昌.交流励磁发电机双通道励磁系统反馈系数的选取原则[J].中国电机工程学报,1999,19(1):122-125.
- [2] Li Q, Pan Z P. The Modeling and Simulation of Brushless Doubly-fed Generator of Wind Power Generation System[C]. In: 4th IEEE International Conf, Power Electronics and Drive Systems, Bali: 2001.
- [3] Wang Zheng, Wang Feng xiang, Zong Ming, et al. A New Control Strategy by Combining Direct Torque Control with Vector Control for Doubly-fed Machine[C]. International Conference on Power System Technology (PowerCon 2004), Singapore: 2004.
- [4] 叶杭冶.风力发电机组的控制技术[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [5] 胡家兵,孙丹,贺益康,等.电网电压骤降下双馈风力发电机建模与控制[J].电力系统自动化,2006,30(8):21-26.
- [6] 孙秋霞,李伟力,程鹏.电网波动下双馈风力发电系统的仿真分析[J].现代电力,2006,23(4):30-34.
- [7] 何良.双馈风力发电系统仿真和控制策略研究[D].上海:上海交通大学,2006.
- [8] Petersson A, Lundberg S, Thiringer T. Evaluation of Current Control Methods for Wind Turbines Using Doubly-fed Induction Machines[C].IEEE Trans. On PE, 2002.