

基于空间电压矢量的软起动器变频阶段的优化及仿真^{*}

孟彦京, 齐鹏策, 高泽宇

(陕西科技大学 电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 对于空间电压矢量软起动器变频阶段的负相转矩和转速振荡问题, 依据电压矢量的控制方法, 对频率转换点的选取实行优化。以电机负载状况来获取各个变频阶段的控制角初始值, 以恒压频比原则获取控制角终值, 以此对软起动器变频阶段的控制进行优化。最后对优化后的软起动器进行仿真验证, 结果显示, 软起动器工作在变频阶段时, 在频率转换点出现的转速超调得到了改善, 电流峰值有所减小, 没有负转矩出现。

关键词: 软起动器; 空间电压矢量; 变频控制; 频率转换点

中图分类号: TM 343⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)10-0001-04

Optimization and Simulation of Frequency Conversion Phase of Soft Starter Based on Space Voltage Vector^{*}

MENG Yanjing, QI Pengce, GAO Zeyu

(College of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: For the negative phase torque and rotational speed oscillation problems in the frequency conversion stage of the space voltage vector soft starter, the selection of the frequency conversion point was optimized according to the control method of the voltage vector. The initial value of the control angle of each frequency conversion stage was obtained with the motor load status, and the final value of the control angle was obtained with the constant voltage-frequency ratio principle, so as to optimize the control of the frequency conversion stage of the soft starter. Finally, the optimized soft starter was verified by simulation. The results showed that, when the soft starter was operating in the frequency conversion phase, the overshoot of the speed at the frequency conversion point was ameliorated, the current peak value was reduced, and no negative torque appeared.

Key words: soft starter; space voltage vector; frequency conversion control; frequency conversion point

0 引言

三相异步电机具有结构简单、价格低廉及运行可靠等优势, 在现代工业生产中得到广泛运用。在实际运用中, 异步电机存在高起动电流及低起动转矩等问题^[1-2]。依靠降压来减小冲击电流的

同时, 电机的转矩也会降低, 导致电机难以起动重载及带大惯性负载的设备^[3-4]。使用变频器来软起动电机存在 2 个缺陷: 工频旁路难以达成, 成本高。

文献[5-6]首次提出离散变频的控制理论, 使电机软起动器的调频调压成为可能。文献中介

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51577110)

作者简介: 孟彦京(1956—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子与电气传动、电机控制与变频调速。

齐鹏策(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机变频控制与电机软起动。

高泽宇(1991—), 男, 硕士, 研究方向为电力电子应用与电机软起动控制。

绍了如何生成离散频率,并且给出了选择正负相序电压的方法,然而通过该软起动方式来启动电机,电机的转矩脉动过大,并不能投入实际使用^[7-9]。文献[10]初次提出正弦空间电压矢量软起动方法。文献[11-12]讨论了正弦空间电压矢量下的电机定子磁链的形成轨迹,然而空间电压矢量变频软起动在变频阶段仍然存在转速剧烈振荡问题,且变频后出现负转矩,影响空间电压矢量变频软起动器的正常使用。

本文依据变频控制中电压矢量的控制方法,对频率转换点的选取及各个分频段的运行进行改善,最后应用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型,对比优化前后电机的转矩转速波形,证实优化的可行性。

1 正弦空间电压矢量变频原理

正弦空间电压矢量变频思想是将定子磁链作为被控对象,主电路为三相反并联晶闸管组成的调压电路,在三相电压供电下,让其中两相处于导通状态,产生 1 个电压矢量。如图 1 所示,在 7 个工频周期中,依次导通相应的晶闸管,分别产生 u_{AC} 、 u_{BC} 、 u_{BA} 、 u_{CA} 、 u_{CB} 、 u_{AB} 6 个空间电压矢量,改变临近矢量的触发间隙,可产生其他分频段的矢量控制。调整晶闸管的控制角,可以调整定子磁链幅值。将控制角与其磁链轨迹相联合实行磁链控制,应用在电机的起动控制中,可达成电机的有级变频软起动,提高电机的起动转矩。

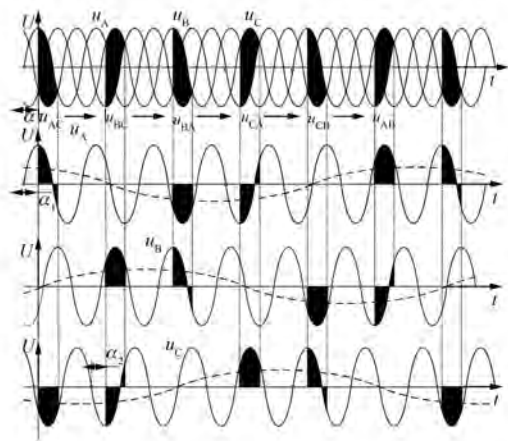


图 1 正弦空间电压矢量生成示意图

经过大量的仿真与试验验证,当软起动器工作在变频阶段时,各个分频段之间的切换存在一

定的问题,导致在分频切换时出现转速超调与较高的电流峰值。本文将对其进行简单的分析,并对存在的问题提出解决方案。

2 软起动器变频阶段的优化

空间电压矢量软起动器的控制过程分为变频过程和调压过程。总的起动过程为 7 分频阶段切至 4 分频阶段,然后切至 3 分频阶段,最后切至工频升压阶段。其变频段为有级变频,可变频率级数不持续,相邻频级之间变化大,因此本文所提出的优化即针对其变频阶段的控制。以下分别对控制角的选取以及频率转换点实行优化。

2.1 频率转换点的优化

频率转换点的优化原则主要有 2 个方面,即当下分频段转速平稳后转换频率和整周期点的频率转换。

由电机学原理可知,在各个分频阶段中,电机额定转速与分频段一一对应。因此在电机转速平稳后再进行频率转换,能降低转差率,降低频率转换点的电机定子电流。如果在当下分频转速未稳定时切换频段,在不同的动态过程中切换会让电机转速振荡加剧,产生较大的冲击电流。

离散变频的切换方法包括:半周期点切换,整周期点切换及周期内任意点进行切换。选择在完整控制周期末切换,是因为空间电压矢量变频软起动器在各个分频控制中,都是按一致次序触发晶闸管来产生电压矢量,能使频率转换点仍然保持控制电压矢量作用次序的一致性。例如,当下各个控制周期皆以 u_{AC} 为起点,以 u_{AB} 为末点,于矢量 u_{AB} 作用末了时刻即整周期点进行频段转换,下一个频段重新以 u_{AC} 为起点,保持了一致的作用次序,让电磁转矩都为正相,也使得每个分频段中定子磁链轨迹和空间电压矢量都是完整的。若选择半周期点切换即 u_{BA} 作用结束后切换,新频段从 u_{AC} 开始,等同于电机定子磁链正转 3 次后反转了 1 次,由电机转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} p_0 \psi_s \times i_s$$

可知,转矩显示为正负相间,因此从半周期点切换会导致电机出现负相转矩,相应地增大了电机的转矩脉动。同理可知周期内任意点转换频率将导致同样的结果。

2.2 各级分频控制角的选择

在起动过程中,控制角选取的基本原则是恒压频比控制,即使定子相电压与定子电压频率的比值不变,就可使得异步电机的磁通不变,以此获取一定大小的恒定磁链。但在现实运用时,低频时定子绕组的漏感压降不可忽视,因此要对电机控制电压给予一定的补偿。

当软起动器工作在变频阶段时,于各个分频段控制的初始点会有较大的电流尖峰,并且在电机运转中发生转速超调。下面对其产生原因进行简单的分析。

在异步电机分频控制下,其电磁转矩增加较大,并且减小了各个分频段的电机转速初值与分频所对应的额定转速的差值。在频段转换刚开始时,电机转速得到的加速较大,但是转速的提升空间较小,转速增加过快从而导致转速出现超调。

因为存在上述控制问题,仅仅按照恒压频比的原则来选择控制角是不够的。根据对于存在问题的分析,针对性地提出了获取控制角的再次优化,即以恒压频比控制作为获取控制角的基本准则,在所获取控制角的基础上,给其一个渐变区域,以此区域的最大值为频率转换时的控制角,之后随着转速的增大,慢慢降低控制角直到恒压频比控制的角度,相当于在每个频段加入1个调压调速的控制。

在此以7分频为例作详细阐述。如图2所示,当电机的负载转矩为 $140\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,只要晶闸

管控制角低于 120° ,都能让电机的电磁转矩高于其负载转矩。若需要起动电流足够小,只需将初始控制角设置得足够大即可,但是电机需要一定起动转矩来保证电机的起动速度,控制角初始值选取 107.5° ,在其转速增大时,缓慢减小控制角到 93° ,让电机在7分频下稳定运行。当异步电机所带负载不同时,各个阶段控制角的初值可根据负载大小情况来获取。当负载值较小时,选择较大的控制角初始值。如此既可在改变频率的初始阶段让电机有一定的转矩来提高转速,又可让转速增大较为平缓,减小频率改变后的转速超调,去除切换时的负向转矩,使转速在频率转换后快速平稳,相应地减少电机起动电流。

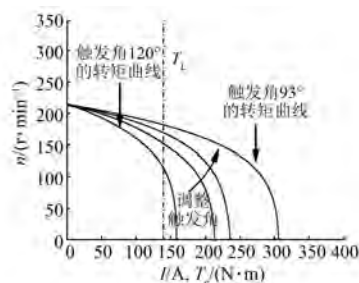


图2 7分频控制角优化选择

3 系统仿真结果

依据空间电压矢量变频软起动器的原理,在MATLAB中创建了仿真模型,如图3所示。模型

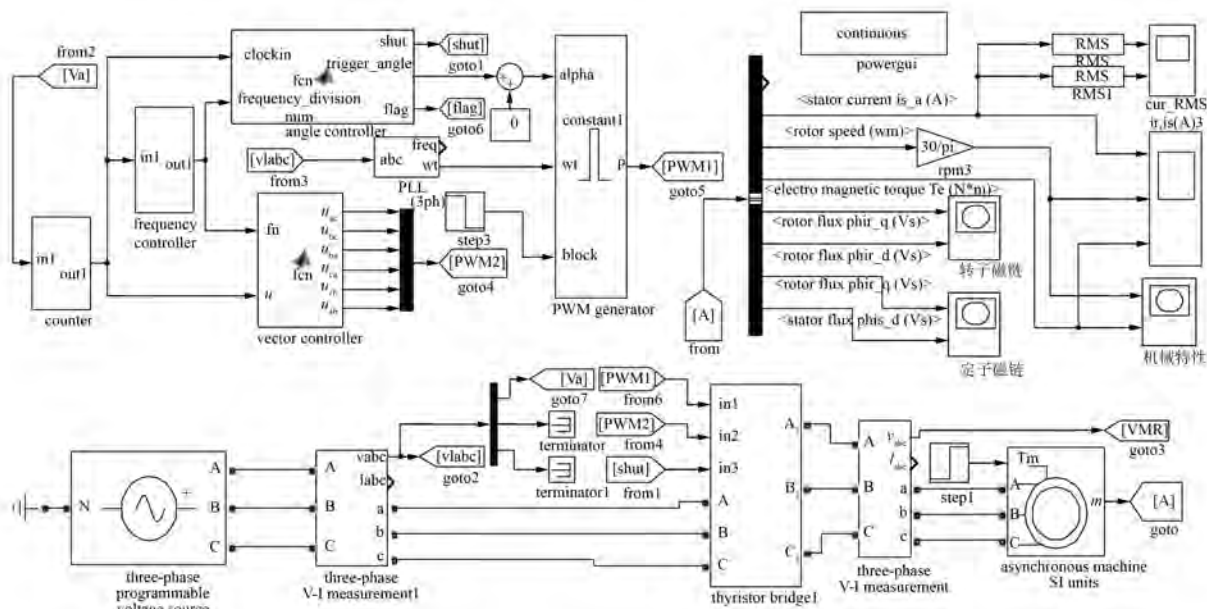


图3 空间电压矢量变频软起动器仿真模型

中使用的电机参数: $P_N = 30\text{ kW}$, $U_N = 380\text{ V}$, $R_N = 1\ 460\text{ r/min}$ 。

在对控制系统进行优化之前,按照恒压频比的原则来选取控制角,其各级控制角的选择如表 1 所示。

表 1 软起动器未优化仿真中各级分频控制角

分频级	工频	3 分频	4 分频	7 分频
控制角/(°)	0	60	92	93

空间电压矢量变频软起动器的未优化仿真如图 4 所示。

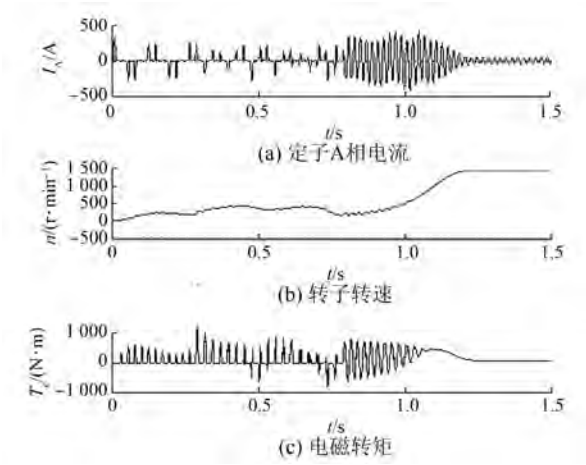


图 4 空间电压矢量变频软起动器的未优化仿真

由图 4 可看到,在 7 分频控制切至 4 分频运行时,转速出现超调,并且出现负相转矩。

按照上述原则对控制角再次优化后,其各级控制角选择范围如表 2 所示。

表 2 软起动器优化仿真中各级分频控制角

分频级	工频	3 分频	4 分频	7 分频
控制角/(°)	86.1~0	85.4~60.0	108.2~92.0	107.5~93.0

优化后的仿真波形如图 5 所示。

软起动器于 7 分频下起动电机,在控制角再次优化后,选择的控制角初值比较大,起动时电流峰值有所减少,并且转矩足以使电机转速增大,在转速升高时,控制角逐渐降低,在转速升高到一定值时,电磁转矩和电流都降低,转速渐渐靠近在 7 分频控制阶段所对应的额定转速,在一个周期后,转速大致平稳在额定转速。在 0.28 s 时,电机由 7 分频段切为 4 分频段,与未优化前的波形进

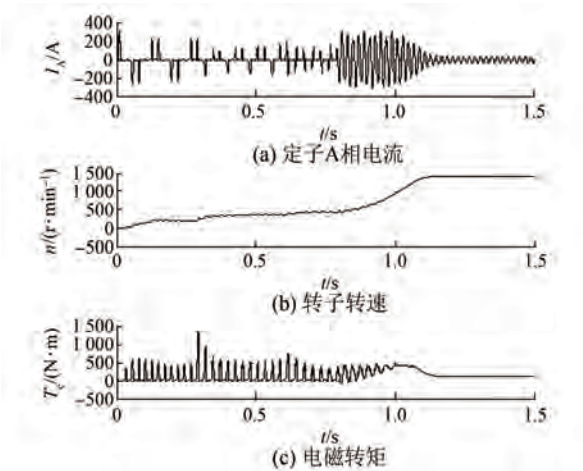


图 5 空间电压矢量变频软起动器的优化仿真

行对比,切换点的电流峰值有所降低,转速提升较为缓慢,无负转矩出现。在 0.52 s 时,频率转换为 3 分频,转速平稳,无超调,没有负转矩和电流冲击。在 0.7 s 时,切换到工频升压阶段,异步电机进入额定运行状态。

4 结 语

本文阐述了使用正弦空间电压矢量实现交变变频的基本理论,对当前空间电压矢量软起动器在频率切换阶段存在的问题进行了简单分析,并针对存在的问题提出了解决方案,将调压调速的手段运用到各个分频控制阶段中,使得电机在频率切换时刻的衔接更为平稳。通过仿真对优化后的软起动器进行验证,结果表明:软起动器工作在变频阶段时,在频率转换点出现的转速超调得到了改善,电流峰值有所减小。解决了空间电压矢量软起动器在变频阶段存在的问题,将对空间电压矢量变频软起动器的实际生产应用起到促进作用。

【参考文献】

[1] 孟彦京,高泽宇,陈君.正弦空间电压矢量的磁链分析及其在软起动器中的实现[J].电子技术应用,2016,42(9): 133-137.
[2] 戴圣伟,王欣,李燕林,等.三相异步电机的智能软起动[J].电机技术,2012(10): 30-32.
[3] 吕广强,许扬,程明,等.新型软起动最小转矩脉动的控制策略研究[J].中国电机工程学报,2005,25(19): 140-145.

(下转第 33 页)

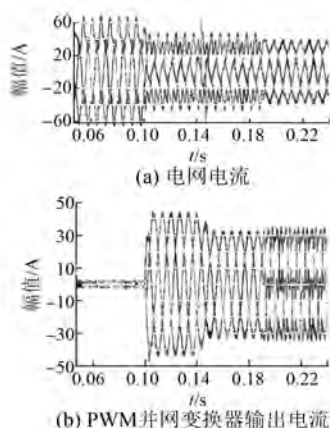


图8 动态无功补偿及谐波抑制的仿真结果

4 结 语

本文分析了传统的电容类和 SVG 类无功补偿方案的不足,提出了由电容补偿加带谐波抑制和动态无功补偿功能的 PWM 并网变换器构成的新型异步电动机无功补偿系统,研究了基于 MSOGI 的谐波提取方法和基于 R 控制器的谐波抑制方法。仿真结果表明:该系统不仅能够实现对异步电机的动态无功补偿,还可实现谐波抑制的功能。

【参 考 文 献】

- [1] 王兆安,杨君,刘进军,等.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,2005.
 - [2] 巩庆.晶闸管投切电容器动态无功补偿技术及其应用[J].电网技术,2007,31(增刊2):118-122.
 - [3] 王思宇.组合式无功补偿控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
 - [4] 崔仙政.油田无功补偿装置故障分析及对策研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017.
 - [5] XIN Z, ZHAO R, MATTAVELLI P, et al. Re-investigation of generalized integrator based filters from a first-order-system perspective [J]. IEEE Access, 2016, 4: 7131-7144.
 - [6] ZHAO R, XIN Z, LOH P C, et al. A novel flux estimator based on SOGI with FLL for induction machine drives [C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE, 2016: 1995-2002.
 - [7] HOLMES D G, LIPO T A, MCGRATH B P, et al. Optimized design of stationary frame three phase AC current regulators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(11): 2417-2426.
- 收稿日期: 2018-04-25
-
- (上接第4页)
- [4] 周振华,崔学深,王月欣,等.感应电机软起动初始两相瞬态电流解析与控制[J].现代电力,2012,29(2):50-55.
 - [5] GINART A, ESTELLER R, MADURO A, et al. High starting torque for AC SCR controller [J]. IEEE Transactions on Energy Control, 1999, 14(3): 553-559.
 - [6] 赵凯岐,王毅,徐殿国,等.晶闸管控制的感应电机中提高起动电磁转矩的一种新策略[J].中国电机工程学报,2004,24(3):145-150.
 - [7] GORBUNOV R L, POSKONYY G I. Symmetrical discrete frequency control for AC-chopper with mutual switching function [C] // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, International Conference of Young Specialists on, IEEE, 2014: 353-358.
 - [8] LI D H, DENG X B. Research on discrete variable frequency soft starting and electricity-economizing control system of induction motor [C] // International Conference on Electric Information and Control Engineering, IEEE, 2011: 4391-4394.
 - [9] NIED A, OLIVEIRE J D, CAMPOS R D F, et al. Soft starting of induction motor with torque control [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(3): 1002-1010.
 - [10] 孟彦京,张陈斌,陈君,等.一种基于正弦波电压空间矢量的新型软起动器[J].电力电子技术,2014,48(7):28-35.
 - [11] 高泽宇.一种基于空间电压矢量的软起动器特性分析及其优化研究[D].西安:陕西科技大学,2017.
 - [12] 陈君.基于预充磁的空间电压矢量变频软起动器研究[D].西安:陕西科技大学,2016.
- 收稿日期: 2018-05-31