

6-14-2018

MATLAB Simulation for Electrically Excited Synchronous Motors with Low Switching Frequency

Qingqing Yuan

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Bin Song

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Yang Na

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

MATLAB Simulation for Electrically Excited Synchronous Motors with Low Switching Frequency

Abstract

Abstract: Switch loss is one of the main energy consumption of the high power transmission system, while the low switching frequency approach is an effective way to improve above issues. However, it will result in a severe harmonic distortion and further affect the control performance. *A selective harmonic elimination pulse width modulation (SHEPWM) strategy has been used to ensure the low energy consumption operation of a diode clamped three-level converter whose load is a high power electrically excited synchronous motors (EESM). For the SHEPWM's characteristics of specific harmonic elimination and harmonic energy moving on the high order, a simple high-pass harmonic filter is designed.* The whole control system of the EESM is established based on the MATLAB/Simulink to verify the effectiveness of the designed strategy.

Keywords

electrically excited synchronous motors (EESM), low switching frequency, SHEPWM, MATLAB simulation, harmonic energy transmission

Recommended Citation

Yuan Qingqing, Song Bin, Yang Na. MATLAB Simulation for Electrically Excited Synchronous Motors with Low Switching Frequency[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2168-2174.

低开关频率下电励磁同步电机的 MATLAB 仿真研究

袁庆庆, 宋斌, 杨娜

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 功率器件的开关损耗是大功率变频调速系统的主要能耗之一, 低开关频率运行是改善能耗问题的有效措施, 但会造成变频器输出谐波畸变严重、控制效果不佳的问题。以电励磁同步电机为对象, 研究了一种适用于低开关频率运行的特定谐波消除的脉冲调制策略, 给出了基于 MATLAB 软件的开关角求解算法。针对该策略特定谐波消除、整体谐波能量迁移的特点, 提出了一种简单 LC 电路进行谐波能量滤除的方法。基于 MATLAB 仿真环境搭建了电励磁同步电机的控制系统, 验证了所设计方案的有效性与可行性。

关键词: 电励磁同步电机; 低开关频率; 特定谐波消除; MATLAB 仿真; 谐波能量迁移

中图分类号: TM341

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 06-2168-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806021

MATLAB Simulation for Electrically Excited Synchronous Motors with Low Switching Frequency

Yuan Qingqing, Song Bin, Yang Na

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Switch loss is one of the main energy consumption of the high power transmission system, while the low switching frequency approach is an effective way to improve above issues. However, it will result in a severe harmonic distortion and further affect the control performance. A selective harmonic elimination pulse width modulation (SHEPWM) strategy has been used to ensure the low energy consumption operation of a diode clamped three-level converter whose load is a high power electrically excited synchronous motors (EESM). For the SHEPWM's characteristics of specific harmonic elimination and harmonic energy moving on the high order, a simple high-pass harmonic filter is designed. The whole control system of the EESM is established based on the MATLAB/Simulink to verify the effectiveness of the designed strategy.

Keywords: electrically excited synchronous motors (EESM); low switching frequency; SHEPWM; MATLAB simulation; harmonic energy transmission

引言

在矿井提升、大型轧钢、冶金石化以及船舶电

力推进等大功率工业传动领域, 变频装置的能耗问题一直是上述耗能大户进行节能减排的重点^[1-2]。大功率变频装置的主要电能损耗包括以下几部分: 谐波损耗、功率器件的开关损耗、电阻热损以及自身用电损耗, 其中功率器件的开关损耗是主要能耗之一^[3-5]。

低开关频率运行是降低器件开关损耗的主要



收稿日期: 2016-07-19 修回日期: 2016-12-09;
基金项目: 安徽省高节能电机及控制技术国家地方
联合工程实验室基金(KFK201509);
作者简介: 袁庆庆(1987-), 女, 江苏启东, 博士, 讲
师, 研究方向为高性能电机控制、系统仿真等。

<http://www.china-simulation.com>

• 2168 •

手段,可有效改善器件发热现象、提高变频器效率与器件寿命,还可在减少额外散热装置的同时降低高频 EMI 问题。然而器件开关频率降低,会造成变频器输出电流谐波畸变严重、低次谐波分量增大等问题,影响装置运行效果^[3-6]。目前,国内外针对低开关频率的研究主要有三大类:一是采用改进 PWM 调制算法^[7],例如特定谐波消除法(selective harmonic elimination, SHEPWM)、谐波最优 PWM (synchronous harmonic optimum PWM, SHOPWM) 等改善变频器输出电流的谐波性能,同时配合一些常规的控制策略实现较高性能调速^[8];二是采用模型预测控制等策略,从控制结构角度出发进行低开关频率下的变频调速控制^[9];三是改进拓扑结构,如采用多重化整流、级联式逆变方式改善输出谐波性能、降低等效开关频率^[10-11]。不管是何种方式都会在解决一部分问题的同时带来额外的问题。以 SHEPWM 调制为例,它可以消除特定低次谐波、改善低开关频率下输出波形性能,但存在问题求解困难、硬件实现代价高的不足,同时算法本身会造成谐波能量向高次迁移的现象,需要进行额外处理。

电励磁同步电机以其可调节的高功率因数、高运行效率以及较强过载能力等特点,广泛应用于各类大功率工业传动领域^[12-13]。较为常见的电励磁同步电机的控制方式有磁场定向控制(FOC)和直接转矩控制(DTC)两大类,以及其他一些基于上述控制的改进方案。本文以电励磁同步电机作为大功率变频调速系统的执行结构,在建立电机复矩阵模型的基础上,针对二极管箝位型三电平逆变器拓扑结构,研究一种适用于低开关频率运行的特定谐波消除算法。首先,给出了完整的基于 MATLAB 软件的算法实现方案,以保证变频装置低能耗运行时的运行效率。接着,针对 SHEPWM 特定谐波消除、整体谐波能量迁移的特点,设计了一种简单 LC 电路进行谐波能量滤除的方法。最后,基于 MATLAB 仿真环境搭建了电励磁同步电机的控制系统,验证了所设计方案的有效性与可行性。

1 电励磁同步电机模型

本文中研究的凸极电励磁同步电机模型较为复杂,一方面是因为电机转子的交直轴不对称,另一方面如果同步电机有阻尼绕组的话,会导致额外的耦合产生。传统的矩阵建模方式不易进行系统分析,复矢量建模又因转子不对称性而不再适用^[14-15]。本文采用传统矩阵与复矢量相结合的方式对凸极电励磁同步电机进行建模,得到的模型方程如下(不考虑阻尼绕组)。

同步机的电压、磁链方程如式(1)所示。

$$\begin{aligned} u_s &= r_s i_s + p\psi_s + j\omega_r \psi_s \\ u_f &= r_f i_f + p\psi_f \\ \psi_s &= l_s i_s + l_m i_f \\ \psi_f &= l_{mm} i_s + L_f i_f \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中的矢量定义为

$$\begin{aligned} u_s &= \begin{bmatrix} u_{sd} \\ j u_{sq} \end{bmatrix}, i_s = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ j i_{sq} \end{bmatrix}, \psi_s = \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ j \psi_{sq} \end{bmatrix}, u_f = \begin{bmatrix} u_f \\ 0 \end{bmatrix}, \\ i_f &= \begin{bmatrix} i_f \\ 0 \end{bmatrix}, \psi_f = \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix}, l_s = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}, \\ l_m &= \begin{bmatrix} L_{ad} & 0 \\ 0 & L_{aq} \end{bmatrix}, l_{mm} = \begin{bmatrix} L_{ad} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

式中:变量 u 为电压; i 为电流; ψ 为磁链,当变量加黑时表示为复变量或矢量。下表 s 为定子绕组; f 为励磁绕组; sd 表示定子绕组的 d 轴分量; sq 为定子绕组的 q 轴分量。 r_s 为定子电阻; r_f 为励磁电阻; ω_r 为转子角速度。 L_d 为直轴同步电感系数; L_q 为交轴同步电感系数; L_f 为励磁绕组电感系数; 而 L_{ad} 、 L_{aq} 分别为直交轴电枢反应电感系数。

2 SHEPWM 的仿真实现及特性分析

2.1 SHEPWM 的原理简介

特定谐波消除 SHEPWM 调制算法的原理已经相当成熟,本文不再赘述;为便于后续仿真实现过程的理解,此处只针对二极管箝位型三电平变频器拓扑结构给出单极性 SHEPWM 的简单介绍,其中三电平变频器拓扑结构如图 1 所示。

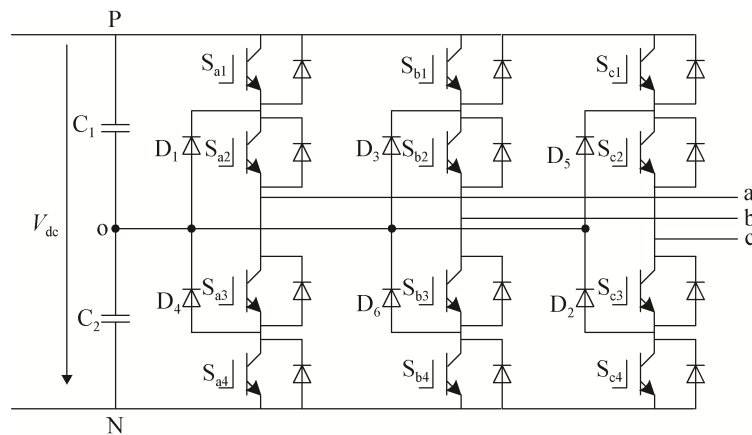


图1 二极管钳位型三电平逆变器拓扑结构
Fig. 1 Topology of the diode clamped three-level converter

考虑 SHEPWM 策略本身的 π 镜像对称、 $\pi/2$ 偶对称特性，其输出单相相电压的 Fourier 级数展开可简化为如式(2)所示。

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \sin n\omega t) \quad (n=1,3,5,\dots) \quad (2)$$

式中： $b_n = \frac{4u_d}{n\pi} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N (-1)^{k+l} \cos n\alpha_k$ ，为各次谐波的谐波幅值； k 为开关次数， α_k 则为对应的开关角，同时满足 $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \dots < \alpha_N < \pi/2$ 。

又因为考虑变频器的三相对称性，即输出线电压中不存在 3 倍频次谐波，因而，对于有 N 个开关角 SHEPWM 算法而言，其可消除 $N-1$ 个谐波分量。假若 $N=7$ ，那么被消除的 6 个谐波分量的次数为 5、7、11、13、17 以及 19，此时对应的开关角求解可结合式(2)表示为式(3)所示。

$$\begin{cases} b_1 = \frac{4u_d}{\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos\alpha_k \\ b_n = \frac{4u_d}{n\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos n\alpha_k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： b_1 通常期望为变频器输出相电压幅值(与调制度 M 相关)， b_n 则为所要消除的 $N-1$ 个谐波分量的电压幅值，故令其为零。SHEPWM 算法实现的目标即为，在确定开关角个数的基础上，求解式(3)所示的超越方程以获取开关角 α_k 值。

2.2 SHEPWM 的仿真实现

由 2.1 节可知，SHEPWM 算法的难点在于求解式(3)所示的超越方程组，这也是一直以来国内外学者在相关领域的研究热点之一^[16]。本文拟基于 MATLAB 强大的数学运算能力，借助其自带的 *fsolve* 函数和曲线拟合技术完成 SHEPWM 开关角 α_k 值的有效可执行运算。

2.2.1 确定迭代初始值

求解超越方程时需要设置合理的初始值才能进行有效迭代，本论文中引用的是参考文献[17]中给出的一种能在调制度全局范围内收敛的初始值计算方法，经过推导可知开关角 $N=7$ 时对应的单极性 SHEPWM 的迭代初始值为

$$\begin{cases} \alpha_{2k-1}^0 = 30^\circ + 15k - \Delta\alpha \\ \alpha_{2k}^0 = 30^\circ + 15k + \Delta\alpha, \quad (k=1,2,3) \\ \alpha_7^0 = 90^\circ - \Delta\alpha \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\Delta\alpha$ 取值只要保证在 $0 \sim 4^\circ$ 范围内，均可保证在全局调制度范围内的收敛；同时，不同开关角对应的迭代初始值可通过修改式(4)中的 k 值来设定。

2.2.2 编写方程求解程序

借助 *fsolve* 函数，在 MATLAB 的 function 函数中编写求解式(3)的程序。以 $N=7$ 为例，首先建立以 *myfun* 命名的超越方程函数，如图 2 所示。

```

function F = myfun(x)
global a1;
F = [cos(x(1))-cos(x(2))+cos(x(3))-cos(x(4))+cos(x(5))-cos(x(6))+cos(x(7))-a1;
cos(5*x(1))-cos(5*x(2))+cos(5*x(3))-cos(5*x(4))+cos(5*x(5))-cos(5*x(6))+cos(5*x(7));
cos(7*x(1))-cos(7*x(2))+cos(7*x(3))-cos(7*x(4))+cos(7*x(5))-cos(7*x(6))+cos(7*x(7));
cos(11*x(1))-cos(11*x(2))+cos(11*x(3))-cos(11*x(4))+cos(11*x(5))-cos(11*x(6))+cos(11*x(7));
cos(13*x(1))-cos(13*x(2))+cos(13*x(3))-cos(13*x(4))+cos(13*x(5))-cos(13*x(6))+cos(13*x(7));
cos(17*x(1))-cos(17*x(2))+cos(17*x(3))-cos(17*x(4))+cos(17*x(5))-cos(17*x(6))+cos(17*x(7));
cos(19*x(1))-cos(19*x(2))+cos(19*x(3))-cos(19*x(4))+cos(19*x(5))-cos(19*x(6))+cos(19*x(7))];

```

图2 N=7时建立的超越方程

Fig. 2 Transcendental equations at N=7

接着基于 *fsolve* 函数编写的超越方程求解程序如式(5)所示, 得到 a 相桥臂上管在 1/4 周期内的开关角与调制度关系如图 3 所示。

$$[x] = \text{fsolve}(@\text{myfun}, x_0, \text{options}) \quad (5)$$

式中: x_0 为初始值; *options* 为 *fsolve* 函数的求解选项。

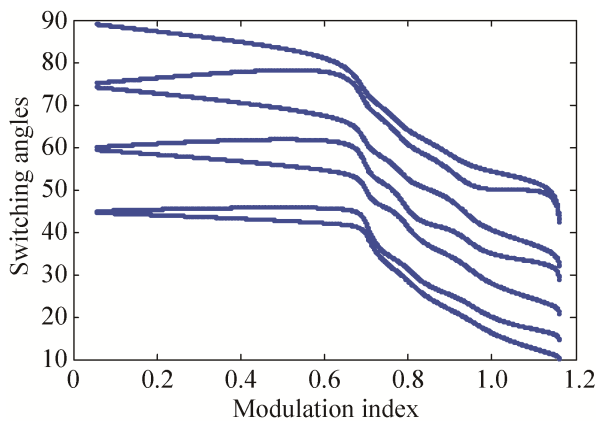


图3 计算得到的调制度-开关角曲线

Fig. 3 Relationship between switch angles and modulation index with SHEPWM (N=7)

a 相下管的对应开关角调制度关系、以及剩余周期内的关系都可用 SHEPWM 输出相电压 π 镜像对称和 $\pi/2$ 偶对称的特性进行求解。

若 a 相桥臂上管的开关角为 θ_{a1} , 则有

$$\text{a 相桥臂下管: } \theta_{a2} = \theta_{a1} + 180^\circ;$$

$$\text{b 相桥臂上管: } \theta_{b1} = \theta_{a1} + 120^\circ;$$

$$\text{b 相桥臂下管: } \theta_{b2} = \theta_{a1} + 300^\circ;$$

$$\text{c 相桥臂上管: } \theta_{c1} = \theta_{a1} + 240^\circ;$$

$$\text{c 相桥臂下管: } \theta_{c2} = \theta_{a1} + 60^\circ.$$

为保证所有开关角范围在 $0 \sim 2\pi$ 之间, 应对计算得到的开关角进行修正, 使其不超过 2π 的角度。

2.2.3 分段线性拟合

因为图 3 所示曲线是连续非线性的, 无法将其直接应用于变频器控制系统, 因而本文采用 MATLAB 中的曲线拟合技术 *polyfit* 和 *polyval* 函数, 采用分段线性拟合方法对图 1 中的曲线进行离散逼近, 得到可实际调用的拟合系数。综合考虑运行精度和求解效率问题, 此处采用 3 次多项式拟合方式, 同时保证每个线性段的拟合误差都限制在 0.001° 以内。采用的 3 次拟合多项式为

$$\alpha = a_3 \cdot m^3 + a_2 \cdot m^2 + a_1 \cdot m + a_0 \quad (6)$$

式中: α 为最终得到的开关角; m 为调制度; $a_k (k=0,1,2,3)$ 为拟合系数。

2.3 SHEPWM 的输出特性分析

SHEPWM 算法可有效解决低开关频率造成的低次谐波严重的问题, 然而输出相电压中的整体谐波能量并未削弱, 出现了谐波能量往高次迁移的现象。文章对比分析了在同样仿真环境下, 常规 SVPWM 与 SHEPWM 在开关频率 $f_s=350$ Hz 时输出相电压的 THD 性能, 分别如图 4~5 所示。

由上述波形可知: (1)两种调制方式在相同仿真环境下的谐波总能量基本一致; (2) SVPWM 调制在低开关频率时会造成输出波形中含有较多的低次谐波成分, 会影响系统运行效果; (3) SHEPWM 调制能有效改善低开关频率下的低次谐波性能(相电压中含有的三次谐波分量在线电压中会被抵消, 因而不会影响控制性能); (4) SHEPWM 调制不能降低输出谐波总能量, 只是将低次谐波能量往高次迁移。

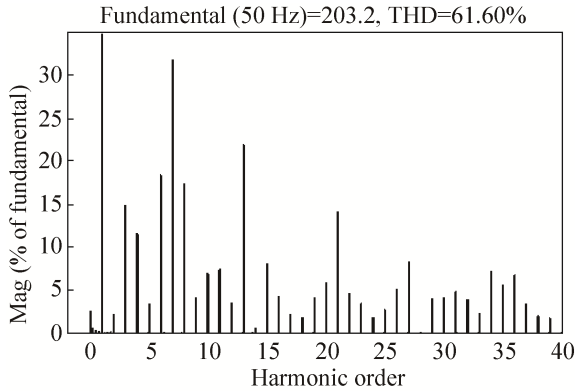


图4 SVPWM调制时变频器输出电压谐波性能($f_s=350$ Hz)
Fig. 4 THD of the output voltage with SVPWM ($f_s=350$ Hz)

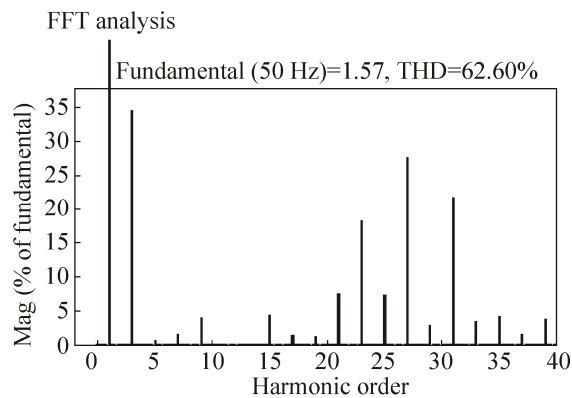


图5 SHEPWM时变频器输出电压谐波性能($f_s=350$ Hz)
Fig. 5 THD of the output voltage with SHEPWM ($f_s=350$ Hz)

因本文设计消除的是 5、7、11、13、17、19 次谐波，因而上述 6 次的谐波能量会被迁移到 23、27、29 以及 31 中，如图 5 所示。

3 控制系统设计

3.1 系统控制框图

SHEPWM 调制会造成谐波能量往高次迁移，但是由于能量增加的高次谐波次数在某一开关频率 f_s 时是基本固定的，因而可以采用简单的滤波电路进行谐波能量衰减。本文借鉴 ABB 中压变频器 ACS6 000 中的内容，设计了一种简单的基于 LC 的高次谐波滤除电路，如图 6 所示，其中的 L、C 参数设计根据所要衰减的指定次谐波次数进行设计。

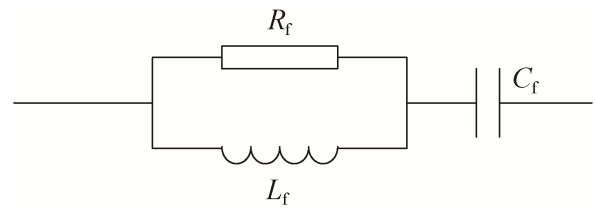


图6 高次谐波滤除电路
Fig. 6 High-pass harmonic filter

选用电励磁同步电机作为拖动系统的执行部件，在 MATLAB/Simulink 仿真环境中搭建如图 7 所示的控制框图，直流侧采用二极管不控整流方式，逆变回路采用三电平二极管箝位型拓扑结构、SHEPWM 调制策略，开关频率为 $f_s=350$ Hz。为模拟大功率运行环境，在 MATLAB 中选择 1 600 kW 电机进行传动系统仿真验证，电机参数见表 1。

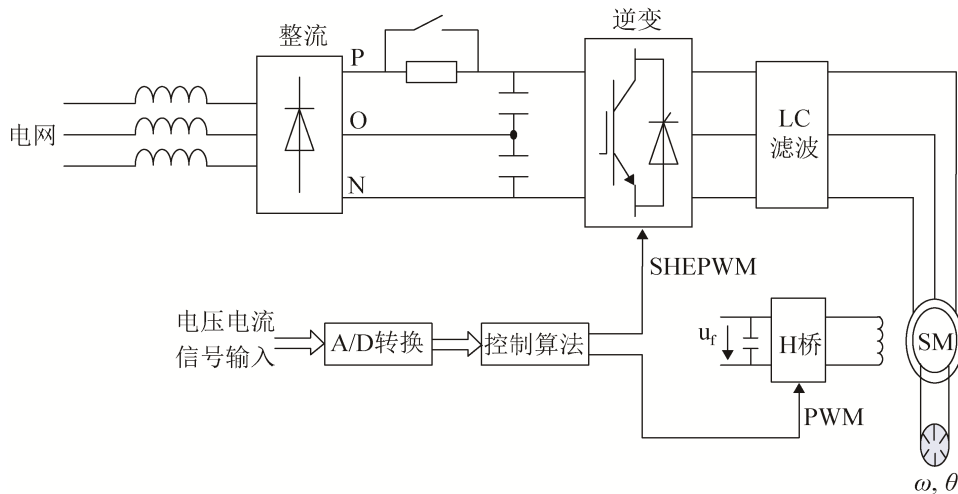


图7 系统控制框图
Fig. 7 Control scheme

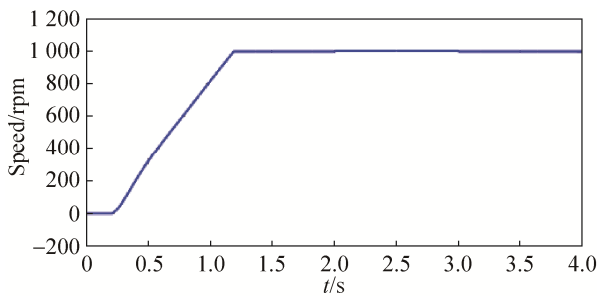
表 1 1 600 kW 电励磁同步电机参数
Tab.1 Parameters of the 1 600 kW EESM

名称	参数值	名称	参数值
功率	1 600 kW	励磁电阻	0.000 157 6 Ω
额定电压	3 300 V	励磁漏感	8.703e-5H
额定频率	50 Hz	定子电阻	0.000 76 Ω
定子漏感	1.273e-5H	直轴电感	5.246e-4H
交轴电感	3.845e-4H	极对数	2

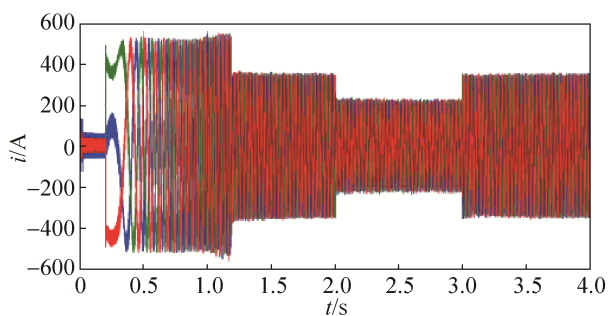
3.2 仿真结果分析

仿真条件: (1) $t=0.2s$ 时, 电机带额定负载, 即 $T_L=T_{LN}$ 启动至 1 000 rad/s; (2) $t=2 s$ 时, 设定 $T_L=0.5T_{LN}$; (3) $t=3 s$ 时, 恢复 $T_L=T_{LN}$ 运行。图 8 为电机从启动到加减载再到稳定时的转速、三相电流波形以及输出电磁转矩 T_e 、负载转矩 T_L 波形。

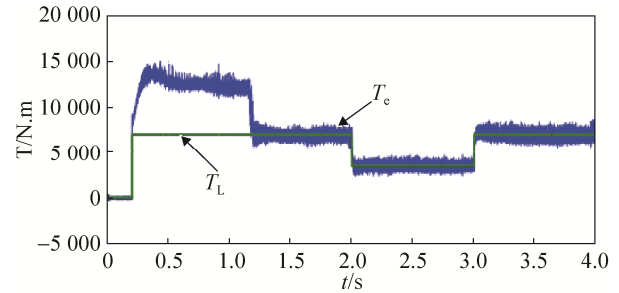
由图 8 的 3 个波形可知, 采用 SHEPWM 调制算法结合一定的电机控制策略, 能够实现大功率电机在低开关频率下的有效运行; 电机加减载过程中, 转速基本保持恒定, 验证了该传动系统的抗扰鲁棒性能。图 9 所示则为定子 a 相电流(缩小后)与对应的 a 相开关管脉冲波形, 逆变器在低开关损耗的同时保证了大功率电励磁同步电机的有效运行。



(a) 电机转速波形



(b) 电机三相定子电流波形



(c) 电磁转矩与负载转矩波形

图 8 动稳态过程中电机响应波形

Fig. 8 Dynamic response waveforms

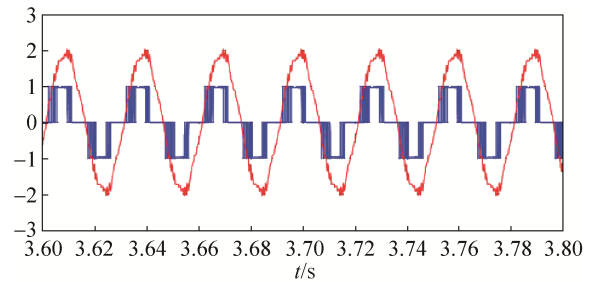


图 9 电机定子 a 相电流(缩小)及 a 相开关管脉冲

Fig. 9 Current of phase a (reduction) and pulse of phase a

4 结论

为降低大功率变频调速系统中的开关损耗, 本论文选用 SHEPWM 特定谐波消除法作为二极管箝位型三电平逆变器的调制策略, 进行低开关频率下的电励磁同步电机调速系统研究。针对 SHEPWM 调制开关角求解困难的问题, 研究了一种基于 MATLAB 强大的数学运算能力, 借助其自带的 *fsolve* 函数和曲线拟合技术完成开关角 α_k 值有效可执行计算的方法。给出了 SHEPWM 算法的仿真实现过程及与常规 SVPWM 算法的对比分析; 同时, 针对 SHEPWM 特定谐波消除、整体谐波能量迁移的特点, 设计了一种简单 LC 电路进行谐波能量滤除的方法。最后, 基于 MATLAB 仿真环境搭建了电励磁同步电机的控制系统, 验证了所设计方案的有效性与可行性。

参考文献:

- [1] 苏州汇川技术有限公司. 汇川技术 HD93 系列 8MVA 高压变频器在电励磁同步电机上的应用[J]. 变频器世界, 2015(3): 63-66.

- Suzhou Inovance Technology Co., Ltd. Application of Huichuan technology HD93 series 8MVA high voltage inverter in electrically excited synchronous motor[J]. The World of Inverters, 2015(3): 63-66.
- [2] Quoc Khanh Nguyen, Johannes Schuster, Jorg Roth-Stielow. Energy optimal control of an electrically excited synchronous motors used as traction drive[C]// 9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, Seoul, Korea, 2015: 2789-2795.
- [3] 马小亮. 概述低开关频率 PWM 变频的问题及解决办法[J]. 电气传动, 2009, 39(5): 3-9.
MA Xiaoliang. Problems and solutions of low frequency PWM inverters-an overview[J]. Electric Drive, 2009, 39(5): 3-9.
- [4] 赵冰洁. 三电平不连续调制技术及其低开关频率控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
Zhao Bingjie. Research on three-level discontinuous modulation and low switching frequency control[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [5] Siemens A G. Power semiconductors: for medium voltage converters-an overview[C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications. Spain: EPE, 2009: 121-134.
- [6] Bose B K. Power electronics and motor drives: advances and trends[M]. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2006: 917.
- [7] Franquelo L G, Napoles J, Portillo R, et al. A flexible selective harmonic mitigation technique to meet grid codes in three-level PWM converters[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics (S0278-0046), 2007, 54(6): 3022- 3029.
- [8] 伍小杰, 袁庆庆, 符晓, 等. 基于复矢量调节器的低开关频率同步电机控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 124-129.
WU Xiaojie, YUAN Qingqing, FU Xiao, et al. A novel complex state current controller for Synchronous motor at very low switching frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 124-129.
- [9] Kouro S, La Rocca B, Cortes P, et al. Predictive control based selective harmonic elimination with low switching frequency for multilevel converters[C]// Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, 2009: 3130-3136.
- [10] Bernet J S, Wu B. Multilevel voltage source converter topologies for industrial medium-voltage drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2007, 54(6): 2930-2945.
- [11] 利德华福. 高压变频调速技术在交通与节能领域的应用—利德华福专访游小杰教授[OL]. (2008-07-15). <http://www.gkong.com/html/news/2008/7/24189.html>. Harvest. The applications of high voltage converters in the field of transportation and energy conservation - an interview for professor YOU Xiaojie [OL]. (2008-07-15). <http://www.gkong.com/html/news/2008/7/24189.html>.
- [12] 吴轩钦, 谭国俊, 何凤有, 等. 电励磁同步电机转子高频电流信号提取无速度传感器控制[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(6): 61-68.
WU Xuanqin, TANG Guojun, HE Fengyou, et al. Speed sensorless control with extracting high-frequency current signal from rotor of electrically excited synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(6): 61-68.
- [13] 刘洋, 史黎明, 赵鲁, 等. 电励磁同步电机惯性储能直流馈电系统新型单位功率因数控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 147-154.
LIU Yang, SHI Liming, ZHAO Lu, et al. A novel unity power factor control of electrically excited synchronous motor in an inertia wheel energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1):147-154.
- [14] M Seilmeier. Modelling of electrically excited synchronous machine (EESM) considering nonlinear material characteristics and multiple saliencies[J]. European Conference on Power Electronics & Application, 2011, 41(8): 1-10.
- [15] 袁庆庆. 双三电平 PWM 变频器低开关频率关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
YUAN Qingqing. Study of the back to back three-level PWM converter with a low switching frequency[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [16] 胡存刚, 王群京, 李国丽, 等. 一种新的 SHEPWM 三电平逆变系统的仿真和实验研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16): 4425-4428.
HU Cun-gang, WANG Qun-jing, LI Guo-li, et al. Simulation and Experimental Research on SHEPWM Technique Applied to Three-Level Inverter[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(16): 4425-4428.
- [17] 符晓. 电励磁同步电机低开关频率控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
FU Xiao. Control of electrically excited synchronous machine at low switching frequency[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.