

基于定子电阻自适应辨识的感应电机死区补偿

徐翔¹, 崔冉冉²

(1. 洛阳矿山机械工程设计研究院有限责任公司, 河南 洛阳 471039;

2. 洛阳市第二中学, 河南 洛阳 471000)

摘要: 电压源型逆变器由于死区效应, 导致输出发生非标准化、畸变, 影响感应电机的控制精确度, 特别是无速度传感器矢量控制, 同时造成电网侧能量的流失。为了减小死区效应产生的影响, 列出误差计算公式, 求得总延时时间。另外, 对定子电阻进行自适应辨识, 增加所求延时时间精确度的同时可以运用到电机矢量控制中。经过补偿误差电压, 提高了控制性能, 降低了对控制系统的影响。结果表明所提补偿策略对电流波形、总谐波失真具有改善作用。

关键词: 感应电机; 矢量控制; 逆变器; 死区效应

中图分类号: TM 346+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)08-0037-04

Dead-Time Compensation of Induction Motor Based on Stator Resistance Adaptive Identification

XU Xiang¹, CUI Ranran²

(1. Luoyang Mining Mechanical Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, China;

2. Luoyang No.2 Middle School, Luoyang 471000, China)

Abstract: Due to dead-time effect, the output of voltage source inverter was non-normalized and deformed. Dead-time effect affected the control accuracy of induction motor, especially for the speed sensorless vector control. It also caused the loss of power on the grid side. In order to reduce the influence of dead-time effect, the output voltage error calculation formula was listed to find out the total delay time. In addition, adaptive identification of stator resistance was carried out to increase the accuracy of delay time, which could apply to motor vector control as well. By compensating the error voltage, the control performance was improved and the influence on the control system was reduced. The results showed that the compensation strategy could improve the current waveform and total harmonic distortion.

Key words: induction motor; vector control; inverter; dead-time effect

0 引言

矢量控制使感应电机不再需要速度传感器, 能精简设备且提高维修效率^[1]。在电压源型脉宽调制(PWM)技术中功率开关管是必不可少的一部分。为了防止逆变器单相开关管一并通路而引入了死区时间, 但是死区时间将影响感应电机的控制性能、降低使用寿命。为此, 研究者开始关注死区时间对控制效率的影响。

补偿方法主要分为时间法和电压法。时间补

偿法需要知道死区时间, 并且需要确定明确的极性分界点, 从而通过控制信号进行补偿^[2]。电压补偿法需要借助电信号的反馈实现, 其中电流反馈补偿依靠电流极性, 在过零点时容易产生误补偿, 而电压反馈补偿硬件较复杂, 成本较高^[3]。另外还有人工检测的措施, 难以规模化。

文献[4]将死区时间等效到脉冲时间中进行补偿, 理论上易于实现, 但补偿效果较差。文献[5]利用有效矢量作用时间与总时间的关系, 重新进行了时间补偿。文献[6]在计算误差电压时

考虑不够全面,仅考虑了开关器件的关断、驱动信号及固延延时。文献[7]提出通过人力检测电流与电压延时之间的关系,手工操作,因此不适于工业生产中。本文提出了死区效应补偿算法,利用激励电流求出死区的总延时时间,但由于定子电阻值随温度而变化,延时时间不够准确,所以采用模型参考自适应系统(MRAS)基本结构,求出自适应定子电阻值,最后将自适应电阻值代入后求出延时时间。

1 非线性原理分析

由于开关器件的固有因素影响,电压源型逆变器中的开关件不能达到理想的开关状态。在脉冲信号控制的过程中容易产生同时导通的情况。为了防止单相电流径直流而短路,故设置一段时间,即死区时间 T_d 。由于反并联二极管的存在,在死区时间内仍有电流流出,但是开关器件的非线性特性导致输出波形有畸变,影响电机性能,缩短电机寿命,故需补偿以削弱死区导致的性能降低。三相电压源型电机驱动逆变器系统如图1所示。当电流方向与图1一致时,输出电压与上桥臂相关,受上桥臂控制;相反,电流方向相反时受相桥臂下管控制^[8]。在上下桥臂同时关断时,即死区时间 T_d 内,电流在开关管截止,输出电压与桥臂开关管无关,与并联二极管有关,由相电流的流向而定。

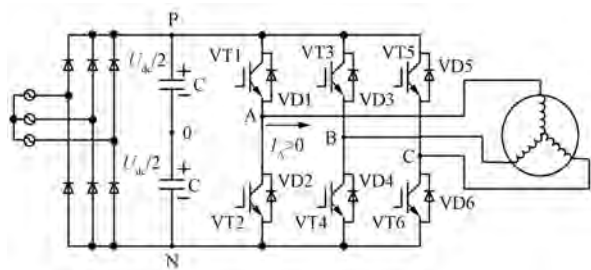


图1 三相电压源型电机驱动逆变器系统

鉴于以上分析,根据输出电压误差产生的原因,可将误差归纳为3种^[9]:

(1) IGBT和二极管的导通压降,二者的特性与电压和温度相关。

(2) 为了避免单相短路而加入的死区时间 T_d ,使该时间段不受信号控制,所产生的误差与载波频率有关。

(3) 开关器件的开关延时,包含:开关器件接收到动作信号后开始动作的延时;从下达控制信号到接收控制信号的传递延时;开关器件自身的特性,即正向电压上升、下降所需时间。

2 误差计算

将C相IGBT关闭,通入直流激励电流 I_A^* 后电机静止,导通时间不宜过长且控制在额定电流有效值以下,否则电阻值会发生变化。

在电流 I_A^* 下逆变器输出相电压误差的估计值 $\hat{U}_{err}$ 为

$$\hat{U}_{err} = U_{err} + I_A^* \cdot (R_s - \hat{R}_s) \quad (1)$$

式中: U_{err} ——逆变器输出相电压误差的真实值;

$R_s, \hat{R}_s$ ——定子电阻的实时值与推测值。

采用同一电流不同PWM频率测量后相减可以消去推测定子电阻值 $\hat{R}_s$:

$$\Delta \hat{U}_{err} = \Delta U_{err} + I_A^* \cdot (R_{s1} - R_{s2}) \quad (2)$$

式中: $\Delta \hat{U}_{err}, \Delta U_{err}$ ——2个不同频率激励电流所得到的相电压误差估计值的差 ($\hat{U}_{err1} - \hat{U}_{err2}$) 及相电压误差真实值的差 ($U_{err1} - U_{err2}$);

R_{s1}, R_{s2} ——2次不同频率激励电流测得的定子电阻值。

逆变器的相电压输出误差真实值 U_{err} 为

$$U_{err} = \left[\frac{U_s + U_d}{2} + U_{dc} f_{PWM} t_{total} \right] \text{sign}(i) \quad (3)$$

其中: $\text{sign}(i)$ 取 ± 1 , 与桥臂中电流方向相关, 流入负载侧的取 $+1$; U_s 和 U_d 为 IGBT 和二极管导通后器件自身压降, 是器件固有属性, 随电流而变, 可查阅相关手册得到; U_{dc} 基本不随运行状态而变, 通过测量可得; f_{PWM} 为所采用的直流激励频率。

电压总延时时间 t_{total} 的表达式为

$$t_{total} = T_d + t_{turn-on} - t_{turn-off} \quad (4)$$

其中: $t_{turn-on}, t_{turn-off}$ 分别代表开通、关断与理想状态的误差延时, 为电压误差产生原因中的第3种情况, 由于现有技术条件达不到理想状态而产生了等效开关延时。

联立式(2)~式(4), 得:

$$\Delta \hat{U}_{err} = U_{dc} \cdot \Delta f_{PWM} t_{total} + I_A^* \cdot (R_{s1} - R_{s2}) \quad (5)$$

则可得总延时时间的表达式为

$$t_{\text{total}} = \frac{\Delta \hat{U}_{\text{err}} - I_A^* \cdot (R_{S1} - R_{S2})}{U_{\text{dc}} \cdot \Delta f_{\text{PWM}}} \quad (6)$$

式中: Δf_{PWM} ——激励频率之差。

定子电阻在电机运转过程中会发生形变,属于不确定因素。在用 MRAS 辨识系统时,利用自适应率可得到电阻值^[10]。在搭建模型时需要将含电阻项的模型作为可调模型,同时加入滤波器滤除低次谐波。调试可调模型使其输出一致,得到最佳参数,即可求出随电机状态变化的电阻值。图 2 所示为基于转子磁链广义误差构建的 MRAS 系统结构^[11]。

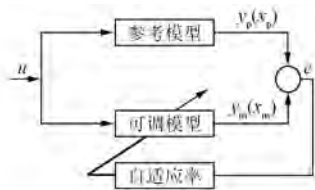


图 2 MRAS 系统结构

根据感应电机的状态模型,按照 MRAS 基本结构,对于定子电阻的辨识采用 PI 控制:

$$R_s = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (\psi_{\text{raui}} \psi_{\text{ybi}} - \psi_{\text{ybi}} \psi_{\text{raui}}) \quad (7)$$

其中: R_s 为代入到式(6)的待辨识定子电阻; K_p 、 K_i 为比例积分系数,通过控制可达到最佳自适应性能; $\alpha\beta$ 轴为从 xy 轴坐标变换得到的直角扭转坐标系,双模型的输出均为转子磁链 ψ_r 。

误差作为 PI 调节器的输入,采用合适的参数通过调节可求出定子电阻,不论电阻随温度如何变化均能实时跟随定子电阻值。通过 Popov 超稳定性理论,验证了提出的定子电阻自适应辨识系统状态是渐进稳定收敛的。

3 仿真研究

在 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型,感应电机功率为 2.2 kW,额定频率为 50 Hz,定子电阻为 0.435 Ω ,转子电阻为 0.816 Ω ,漏感为 0.069 3 H,互感为 0.002 H,转动惯量为 0.18 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,电机极对数为 2。采用 Simulink 进行仿真,死区时间设定为 5 μs ,开关频率为 5 kHz,电机期望转速设定为 1 400 r/min。

图 3、图 4 所示分别为无定子、带定子电阻辨识转子磁链图。加入定子电阻辨识后,磁链构建

更迅速。

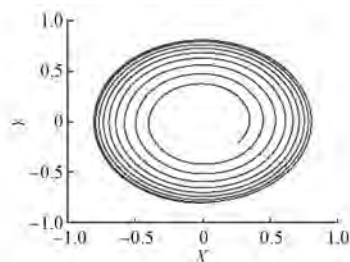


图 3 无定子电阻辨识磁链图

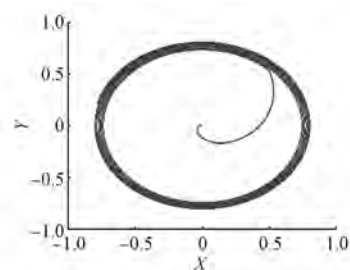


图 4 带定子电阻辨识磁链图

图 5 所示为转速对比图。图 6 所示为转矩对比图。

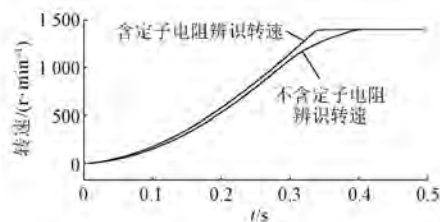


图 5 转速对比图

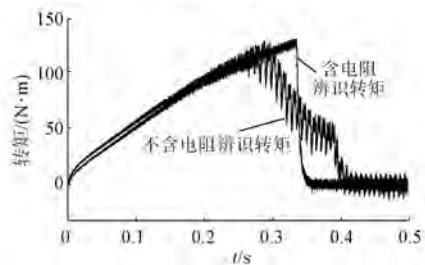


图 6 转矩对比图

从图 5、图 6 可以看出,电机在约 0.34 s 达到稳态,相比不含电阻辨识系统快约 0.06 s。相比不含定子电阻辨识,含定子电阻辨识的转速和转矩达到稳态均更迅速。

电机启动后电流不稳定,属于正常现象,经过约 0.35 s 后平稳。如图 7 所示,补偿后的电流达

到预期状态,与理想状态下的电流曲线基本吻合。如图 8 所示,不含电阻补偿与补偿后的电流存在一定的偏差。

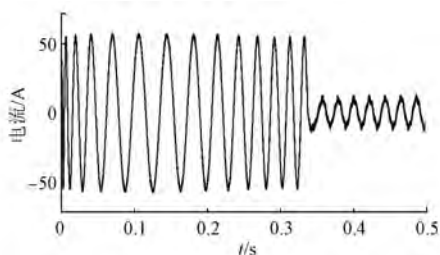


图 7 含电阻辨识与理想状态电流对比

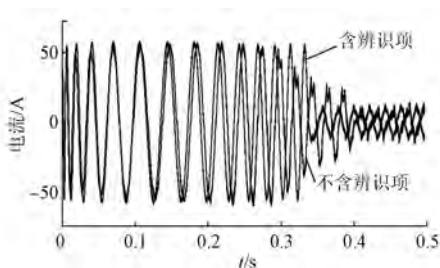


图 8 电流对比图

图 9~图 11 所示为死区补偿前后电流谐波含量示意图。对比图 9~图 11 可知,含电阻辨识补偿后,基波含量比无死区补偿增长 9.16 倍,比无电阻辨识增长 6 倍,总谐波失真(THD)降低明显,电网侧能量利用率提升。对比图 10、图 11 可知,加入电阻辨识后基波含量增加,THD 降低明显。

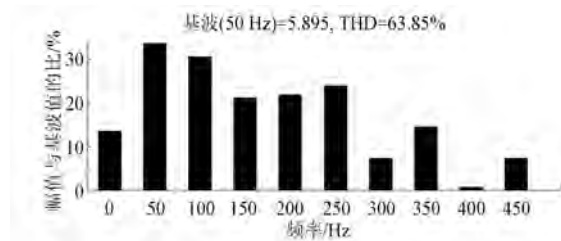


图 9 补偿前电流谐波含量

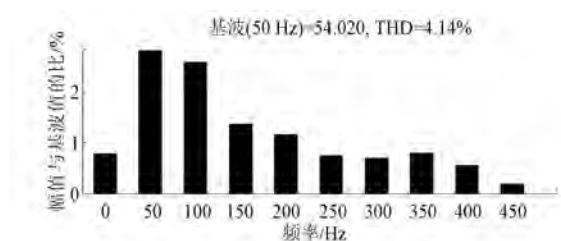


图 10 含电阻辨识补偿后电流谐波含量

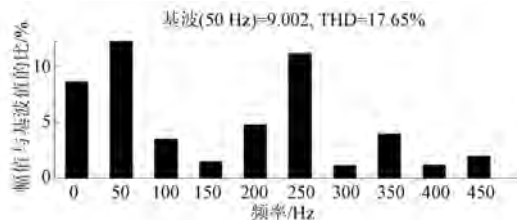


图 11 不含电阻辨识补偿后电流谐波含量

4 结 语

本文在死区效应补偿算法的基础上,采用 MRAS 基本结构,求出自适应电阻值。死区效应补偿算法通过通入直流激励,得到逆变器相电压误差的估计值,2 次测量消去估计电阻,将自适应电阻值代入求出总延的时间 t_{total} 。最后在 MATLAB/Simulink 平台上搭建模型进行仿真,仿真结果验证了该算法对电流波形、THD 具有改善作用,效果显著。

【参考文献】

- [1] DAVARI S A, KHABURI D A, WANG F X, et al. Using full order and reduced order observers for robust sensor-less predictive torque control of induction motors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(7): 3424.
- [2] 潘安.变频器的 IGBT 驱动保护电路及死区补偿研究[D].北京:中国农业大学,2006.
- [3] 贺香.基于自适应滤波死区补偿的交流电机矢量控制系统的研究[D].长沙:湖南大学,2011.
- [4] LEGGATE D, KERKMAN R J. Pulse-based dead-time compensator for voltage inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(2): 191.
- [5] 周华伟,温旭辉,赵峰,等.一种抑制 VSI 零电流箝位效应的死区补偿方法[J].电机与控制学报, 2011, 15(1): 26.
- [6] 刘栋良,贺益康.交流伺服系统逆变器死区效应分析与补偿新方法[J].中国电机工程学报, 2008, 28(21): 46.
- [7] SEILMEIER M, WOLZ C, PIEPENBREIER B. Modelling and model based compensation of non-ideal characteristics of two-level voltage source inverters for drive control application[C] // 2011 1st International Electric Drives Production Conference, 2011.

(下转第 46 页)

同运行状态下,开通位置自适应调节方案能够通过改变导通区间,从而改善系统的运行效率。

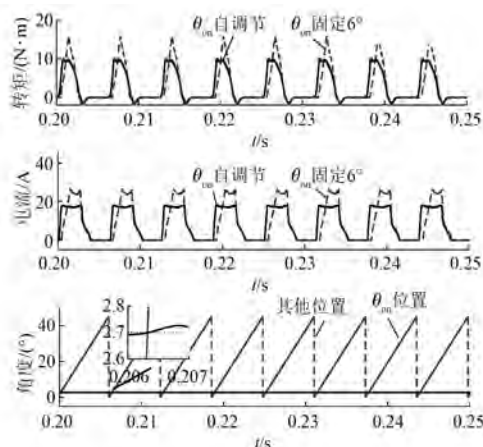


图 11 1 200 r/min 下转矩、电流和开通位置

5 结 语

本文提出了一种基于简化磁链法的 SRM 无位置传感器控制策略,将固定关断角的改进型磁链法和开通位置自适应调节相结合,解决了传统简化磁链法导通区间固定、效率无法达到最优的问题。曲线拟合关断位置磁链模型和开通位置电感模型,在考虑电机阻抗和反电动势时,建立了更加精确的开通位置数学模型。仿真结果表明:所提方法可以准确估计位置和转速,并且能够优化整个系统的运行效率。

【参考文献】

- [1] 王宏华.开关型磁阻电动机调速控制技术[M].2版.北京:机械工业出版社,2014: 31.
- [2] 张小平,周艳红,张铸.矿用电机车开关磁阻电机传动系统控制策略研究[J].系统仿真学报,2016,28(11): 2771.
- [3] 李姗姗,李爱民,王青,等.基于特殊位置检测的开关磁阻电机无位置传感器控制策略[J].电机与控制应用,2018,45(12): 12.
- [4] 蒯松岩,赵帅,张中,等.基于有限元分析的开关磁阻电机电感模型无位置传感器技术[J].电机与控制应用,2017,44(2): 70.
- [5] SHEN L, WU J H, YANG S Y. Initial position estimation in SRM using bootstrap circuit without predefined inductance parameters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (9): 2449.
- [6] 张磊,刘闯.基于电流阈值的开关磁阻电机位置估计容错分析[J].电机与控制应用,2018,45(5): 58.
- [7] LYONS J P, MACMINN S R, PRESTON M A. Flux-current methods for SRM rotor position estimation[C] // Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1991.
- [8] 夏长亮,王明超,史婷娜,等.基于神经网络的开关磁阻电机无位置传感器控制[J].中国电机工程学报,2005,25(13): 123.
- [9] 邱亦慧,詹琼华,马志源,等.基于简化磁链法的开关磁阻电机间接位置检测[J].中国电机工程学报,2001,21(10): 60.
- [10] 曾文禹,刘闯.基于改进型磁链法的开关磁阻电机无位置检测的研究[J].电气传动,2010,40(7): 18.
- [11] 李珍国,李彩红,阚志忠,等.基于改进型简化磁链法的开关磁阻电机无位置传感器速度控制[J].电工技术学报,2011,26(6): 62.
- [12] SOZER Y, TORREY D A. Optimal turn-off angle control in the face of automatic turn-on angle control for switched-reluctance motors[J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(3): 395.

收稿日期: 2019-04-18

(上接第 40 页)

- [8] 沈广通.异步电机逆变器的非线性特性及控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [9] 范波,徐翔.应用于感应电机矢量控制中的逆变器死区补偿[J].计算机测量与控制,2017,25(2): 70.
- [10] 王明渝,陈杨裕,邓威,等.定转子电阻在线辨识的感应电机转速估计方法[J].电机与控制学报,2010,14(4): 66.
- [11] 徐翔,范波,马建伟.基于全阶状态观测器的转子电阻辨识及反馈矩阵设计[J].电机与控制应用,2017,44(1): 51.

收稿日期: 2019-04-26