

内置式永磁同步电机的效率最优直接转矩控制

张兴华, 陈鹏飞

(南京工业大学电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816)

摘要:为提高内置式永磁同步电机驱动系统的运行效率,提出了一种内置式永磁同步电机的效率最优直接转矩控制方法。在建立计及定子铁心损耗的内置式永磁同步电机模型的基础上,分析了电机损耗与转矩、转速和定子磁链的关系,导出了不同运行工况条件下效率最优定子磁链幅值的计算式。通过动态调节定子磁链给定值,实现了内置式永磁同步电机直接转矩控制系统的效率最优控制。实验结果表明,给出的优化控制策略在保持直接转矩控制快速动态响应特性的同时,可有效提高电机的运行效率。

关键词: 内置式永磁同步电机; 直接转矩控制; 损耗模型; 效率优化

DOI: 10.12067/ATEEE1606034

文章编号: 1003-3076(2017)07-0057-06

中图分类号: TM351

1 引言

永磁同步电机(PMSM)具有功率密度大、损耗小、功率因数高、运行噪声低和工作可靠等优点,在电机驱动系统中得到广泛应用^[1]。对于高性能的电机驱动系统,电机的运行效率是一个重要性能指标,尤其是对那些由有限能源供电的电机驱动系统,如电动汽车和航空航天等应用领域。采用效率优化控制技术以减小电机运行时的能量损耗是提高电机驱动系统综合性能的有效途径^[2]。

PMSM的效率优化控制方法主要有两种基本类型^[3,4]:①基于损耗模型的效率最优控制;②在线搜索控制。基于损耗模型的效率最优控制是根据PMSM的损耗模型,计算得到一定工况运行条件下的效率最优定子电流或磁链幅值,其优化速度快,且不需要额外增加硬件。其主要缺点是优化控制的效果很大程度上依赖于电机损耗模型的精度,受电机参数变化的影响较大^[5,6]。在线搜索控制是根据实时检测的输入功率,以一定的步长,不断调节定子电流或磁链幅值以降低损耗。该方法可实现包括逆变器和电机在内的整个驱动系统的效率最优,优化控制不受电机参数变化的影响。其主要缺点是需要额外增加能够实时检测输入功率的传感器设备,且优

化过程收敛慢,易于产生较大的转矩脉动,因此一般不适合于对动态响应快速性要求较高的应用领域^[7]。

在交流电机驱动控制领域,感应电机驱动系统的节能与效率优化控制技术一直受到人们的广泛关注^[8,9],而有关PMSM的节能与效率优化控制技术的研究相对较少。一方面是因为感应电机在工业生产中应用最多,提高其运行效率的经济效益明显;另一方面是因为与感应电机相比较,同样的运行工况下,PMSM具有更高的运行效率,从而使对PMSM进行效率优化控制的需求显得并不迫切。实际上,PMSM在一些非额定工况条件下的运行效率也不高,尤其是对那些经常工作于轻载或负载时常变化工况下的PMSM驱动系统,相应的节能空间依然很大^[10,11]。

本文将基于损耗模型的效率优化方法与直接转矩控制相结合,研究内置式永磁同步电机(IPMSM)的高效快响应控制方法。通过分析内置式永磁同步电机运行时的功率损耗产生机理,建立了计及铁心损耗的电机模型,导出了不同运行工况下效率最优的定子磁链表达式,提出了一种内置式永磁同步电机的效率最优直接转矩控制方法。实验结果表明,该方法在保持常规直接转矩控制的快速动态响应特

收稿日期: 2016-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477073)、江苏省自然科学基金项目(BK20161549)

作者简介: 张兴华(1963-),男,广东籍,教授,博士,研究方向为电机驱动控制、复杂系统控制;
陈鹏飞(1991-),男,江苏籍,硕士研究生,研究方向为电机驱动控制。

点的同时,可有效地降低电机稳态运行时的功率损耗,提高电机驱动系统的综合性能。

2 计及铁损的内置式永磁同步电机模型

在转子磁链同步旋转 d-q 坐标系(d 轴正向为转子磁链 N 极所指方向,q 轴正向为超前 d 轴 90° 电角度的方向)中,计及铁心损耗的内置式永磁同步电机的等效电路模型如图 1 所示^[12]。在考虑电机铁心损耗时,为方便分析,通常在电机感应电压的两端并联一个附加电阻 R_c (虚拟的电阻),以该电阻上的功耗来表示实际的铁心损耗。铁心损耗包括磁滞损耗和涡流损耗,其大小由气隙磁链和电角频率决定,近似与气隙磁链的平方成正比,与磁链矢量的取向无关,这使得不同的轴系的铁损电阻可以采用同样的 R_c ,即 $R_{cd} = R_{cq} = R_c$ 。

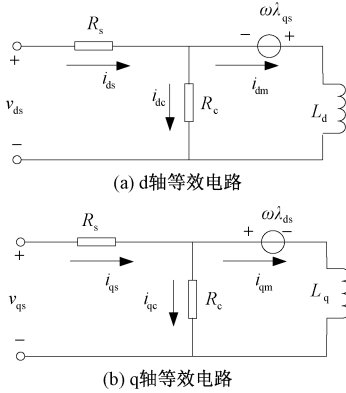


图 1 考虑铁心损耗的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuits taking iron losses into account

由图 1 的等效电路模型,可得电压方程为:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \omega \lambda_{ds} \end{cases} \quad (1)$$

电流方程为:

$$\begin{cases} i_{ds} = i_{dm} + i_{dc} \\ i_{qs} = i_{qm} + i_{qc} \\ i_{dc} = \frac{L_d p i_{dm} - \omega L_q i_{qm}}{R_c} \\ i_{qc} = \frac{L_q p i_{qm} + \omega (L_d i_{dm} + \lambda_f)}{R_c} \end{cases} \quad (2)$$

磁链方程为:

$$\begin{cases} \lambda_{ds} = L_d i_{dm} + \lambda_f \\ \lambda_{qs} = L_q i_{qm} \end{cases} \quad (3)$$

电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [\lambda_f i_{qm} + (L_d - L_q) i_{qm} i_{dm}] \quad (4)$$

运动方程为:

$$J p \omega_r = T_e - T_L - B \omega_r \quad (5)$$

式中, λ_{ds} 、 λ_{qs} 分别为转子磁链坐标系中定子磁链的 d、q 轴分量; i_{ds} 、 i_{qs} 分别为定子电流的 d、q 轴分量; i_{dc} 、 i_{qc} 分别为铁心损耗电流 d、q 轴分量; $i_{dm} = i_{ds} - i_{dc}$, 为定子电流的 d 轴去磁分量; $i_{qm} = i_{qs} - i_{qc}$, 为定子电流的 q 轴转矩分量; v_{ds} 、 v_{qs} 分别为定子电压的 d、q 分量; L_d 、 L_q 分别为 d、q 轴电感; R_s 为定子绕组电阻; R_c 为等效铁心损耗电阻; n_p 为极对数; ω_r 为转子机械转速; $\omega = n_p \omega_r$, 为同步转速; J 为转子惯量; B 为粘滞摩擦系数; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; λ_f 为转子永磁链; p 为求导算子。

3 功率损耗分析

电机损耗主要包括机械损耗和电气损耗两部分,机械损耗由电机的机械摩擦与风阻等产生,通常不可控;电气损耗则包括定子铜损耗和铁心损耗,其中铜损耗 P_{cu} 为定子绕组电阻 R_s 上功耗,若电机运行已达到稳态,则 P_{cu} 可写成:

$$\begin{aligned} P_{cu} &= \frac{3}{2} R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \\ &= \frac{3}{2} R_s \left\{ (i_{dm} - \frac{\omega L_q i_{qm}}{R_c})^2 + [i_{qm} + \frac{\omega (L_d i_{dm} + \lambda_f)}{R_c}]^2 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

铁心损耗 P_{fe} 等效为铁心损耗电阻 R_c 上的功耗,可写为:

$$\begin{aligned} P_{fe} &= \frac{3}{2} R_c (i_{dc}^2 + i_{qc}^2) \\ &= \frac{3\omega^2}{2R_c} [(\lambda_f + L_d i_{dm})^2 + (L_q i_{qm})^2] \end{aligned} \quad (7)$$

效率优化的目的就是在一定的电机运行工况下,使电机运行时的总损耗极小。由于电机运行时的机械损耗不可控,通常效率最优控制就是使包括铜损与铁损的电气损耗 P_{loss} (如式(8)所示)最小,或等效地使电机运行效率 η (如式(9)所示)最大。

$$\begin{aligned} P_{loss} &= P_{cu} + P_{fe} \\ &= \frac{3}{2} R_s \left\{ (i_{dm} - \frac{\omega L_q i_{qm}}{R_c})^2 + [i_{qm} + \frac{\omega (L_d i_{dm} + \lambda_f)}{R_c}]^2 \right\} + \\ &\quad \frac{3\omega^2}{2R_c} [(\lambda_f + L_d i_{dm})^2 + (L_q i_{qm})^2] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, P_{out} 为电机输出的机械功率, $P_{out} = \omega_r T_e$ 。

4 效率最优控制

由电机的转矩表达式(4)可得:

$$i_{\text{qm}} = \frac{2T_e}{3n_p[\lambda_f + (L_d - L_a)i_{\text{dm}}]} \quad (10)$$

由于电机在额定转速以下运行时, $(L_d - L_q)i_{dm}$ 远小于 λ_f , 为简化分析过程, 将式(10)定子电流的 q 轴转矩分量 i_{qm} 近似表达为:

$$\dot{i}_{\text{qm}} = \frac{2T_e}{3n_p\lambda_f} \quad (11)$$

将式(11)代入式(8),可得电气损耗 P_{loss} 为:

$$\begin{aligned}
P_{\text{loss}} &= P_{\text{cu}} + P_{\text{fe}} \\
&= \frac{3}{2} R_s \left\{ (i_{\text{dm}} - \frac{2\omega L_q T_e}{3R_c n_p \lambda_f})^2 + \left[\frac{2T_e}{3n_p \lambda_f} + \frac{\omega(L_d i_{\text{dm}} + \lambda_f)}{R_c} \right]^2 \right\} + \\
&\quad \frac{3\omega^2}{2R_c} \left[\left(\frac{2T_e L_q}{3n_p \lambda_f} \right)^2 + (\lambda_f + L_d i_{\text{dm}})^2 \right] \quad (12)
\end{aligned}$$

由式(12)知,电气损耗是电机转速、转矩和定子电流励磁分量的函数,即 $P_{\text{loss}} = f(i_{\text{dm}}, T_e, \omega)$ 。当电机达到稳态时,电机输出转矩和转速为定值,电气损耗 P_{loss} 只和 i_{dm} 有关。令 $\text{d}P_{\text{loss}}/\text{d}i_{\text{dm}} = 0$, 从而有

$$3R_s(i_{\text{dm}} - \frac{2\omega L_q T_e}{3R_{cn_p}\lambda_f}) + \frac{3\omega^2 L_d}{R_c}(\lambda_f + L_d i_{\text{dm}}) + \frac{3R_s \omega L_d}{R_c} \left[\frac{2T_e}{3n_p \lambda_f} + \frac{\omega(L_d i_{\text{dm}} + \lambda_f)}{R_c} \right] = 0 \quad (13)$$

求解式(13),可得电机损耗极小时的 i_{dm} 为:

$$i_{\text{dm}} = \frac{2\omega T_e R_s R_c (L_q - L_d) - 3n_p \omega^2 L_d \lambda_f^2 (R_s + R_c)}{3n_p \lambda_f [\omega^2 L_d^2 (R_s + R_c) + R_s R_c^2]} \quad (14)$$

将式(14)和式(11)分别代入式(3),可得效率最优时,定子磁链的 d、q 轴分量分别为:

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{ds}}^{\text{opt}} &= L_{\text{d}} i_{\text{dm}} + \lambda_{\text{f}} \\ &= \frac{2\omega T_{\text{e}} R_{\text{s}} R_{\text{c}} (L_{\text{q}} - L_{\text{d}}) L_{\text{d}} - 3n_{\text{p}} \omega^2 L_{\text{d}}^2 \lambda_{\text{f}}^2 (R_{\text{s}} + R_{\text{c}})}{3n_{\text{p}} \lambda_{\text{f}} [\omega^2 L_{\text{d}}^2 (R_{\text{s}} + R_{\text{c}}) + R_{\text{s}} R_{\text{c}}]} + \lambda_{\text{f}}\end{aligned}\quad (15)$$

$$\lambda_{\text{qs}}^{\text{opt}} = \frac{2L_{\text{q}}T_{\text{e}}}{3n_{\text{p}}\lambda_{\text{f}}} \quad (16)$$

从而可得最优定子磁链幅值为:

$$\lambda_s^{\text{opt}} = \sqrt{(\lambda_{\text{ds}}^{\text{opt}})^2 + (\lambda_{\text{gs}}^{\text{opt}})^2} \quad (17)$$

图2为IPMSM效率最优直接转矩控制结构图。与传统给定定子磁链幅值的直接转矩控制不同的是,该系统的定子磁链参考值由效率最优定子磁链计算模块根据当前电机的输出转矩与转速,通过实时计算得到。不同的电机运行状态(转矩和转速不

同),对应不同的最优定子磁链给定值,以使电机损耗达到最小,从而提高驱动系统运行效率。

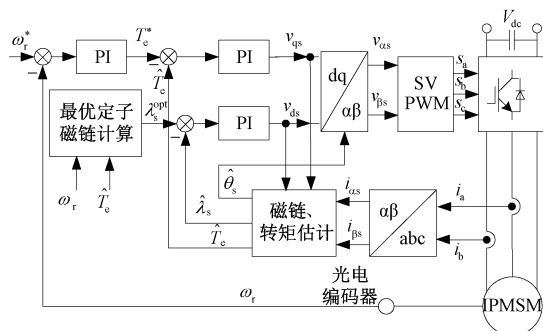


图2 效率最优的直接转矩控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of optimal-efficiency direct torque control system

5 实验结果

为验证本文提出的控制方法的有效性,构建了 IPMSM 驱动控制测试平台。图 3 为实验平台实物照片。驱动测试系统主要包括基于 32 位定点 DSP (TMS320F2812) 的控制板、基于智能功率模块 IPM (PS21865) 的功率驱动板、内置式永磁同步电机(参数见表 1)和直流发电机负载。实验中定子相电流采用霍尔电流传感器检测,直流母线电压采用电阻分压法进行测量,采用 2500p/r 混合式光电编码器测量转速。系统控制软件采用 C 语言编写。实验时取 PWM 中断控制周期为 $100\mu\text{s}$,死区时间为 $3.8\mu\text{s}$,转速控制周期为 1ms 。

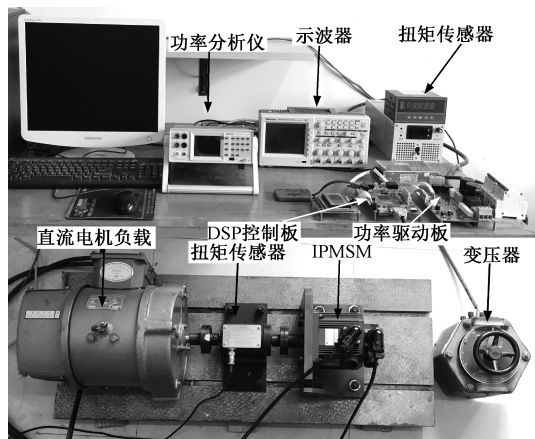


图3 实验平台实物照片

Fig. 3 Photograph of experimental setup

实验中,由于式(12)表达的电机功率损耗涉及定子电流的d轴去磁分量 i_{dm} ,不便直接检测,实际电机的损耗采用式(18)计算:

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{cu}} + P_{\text{fe}} = \frac{3}{2} i_s^2 R_s + \frac{3}{2} \frac{v_o^2}{R_c} \approx \frac{3}{2} i_s^2 R_s + \frac{3}{2} \frac{v_s^2}{R_c}$$

(18)

式中, v_o 为损耗电阻 R_c 两端电压。由于定子电阻的压降远小于端电压, 因此采用 $v_o \approx v_s$ 并不会产生大的测量误差。

表1 内置式永磁同步电机参数

Tab. 1 Parameters of interior permanent magnet synchronous motor

参数	数值	参数	数值
额定功率 P_N/kW	1.3	极对数 n_p	4
额定电压 U_N/V	220	定子电阻 R_s/Ω	1.35
额定电流 I_N/A	5	d 轴电感 L_d/mH	7.76
额定转矩 $T_e/(\text{N}\cdot\text{m})$	5	q 轴电感 L_q/mH	17
额定转速 $n_r/(\text{r}/\text{min})$	2500	永磁体磁链 λ_f/Wb	0.132
铁损电阻 R_c/Ω	225	转子惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.0035

注: 通常在一定的励磁水平下, 铁损电阻随电机的转速增大而增大, 并不是一个固定值。表1中给出的铁损电阻值是在转速 $n_r = 1000\text{r}/\text{min}$ 时的测量值, 通过在 $i_{ds} = 0$ 的矢量控制系统中, 使电机运行在空载条件下测量得到, 具体测量方法见文献[13]。

对常规直接转矩控制和效率最优直接转矩控制两种方法进行实验。图4和图5分别为给定转速 $n_r^* = 1000\text{r}/\text{min}$ 、负载 $T_L = 2\text{N}\cdot\text{m}$ (40% 额定负载, 电机带负载起动) 时, 常规直接转矩控制 (取恒定参考磁链 $\lambda_s^* = 1.25\lambda_f = 0.165\text{Wb}$) 和效率最优直接转矩控制对应的转速与转矩输出响应曲线。可以看出, 二种控制方法的转速与转矩的动态响应速度与稳态控制精度大致相当, 这表明引入效率优化控制算法之后, 直接转矩控制的控制性能并未受到影响, 而效率最优直接转矩控制的相电流的幅值要小于常规的直接转矩控制。

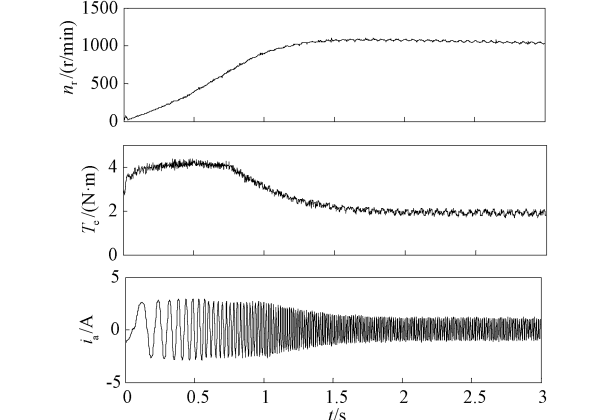


图4 常规空间矢量直接转矩控制曲线

Fig. 4 Waveforms of conventional direct torque control with SVM

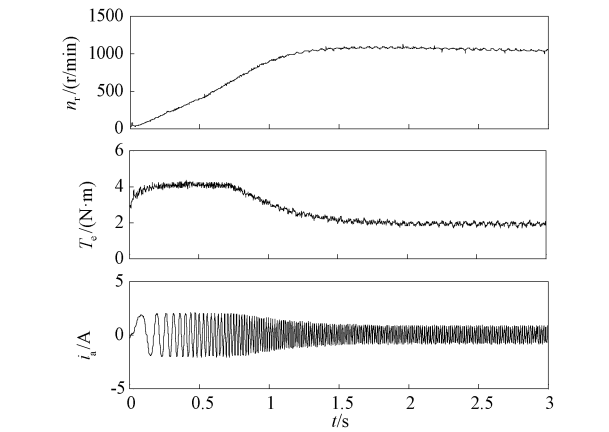


图5 效率最优空间矢量直接转矩控制曲线

Fig. 5 Waveforms of efficiency optimal direct torque control with SVM

图6和图7为二种控制方法 ($n_r^* = 1000\text{r}/\text{min}$, $T_L = 2\text{N}\cdot\text{m}$) 所对应的功率损耗和效率曲线的比较。可以看出, 效率最优直接转矩控制在功耗和效率方面优于传统直接转矩控制, 在电机运行达到稳态时, 损耗由平均约 80W 下降到 70W , 运行效率由平均约 73% 提高到 75% 。

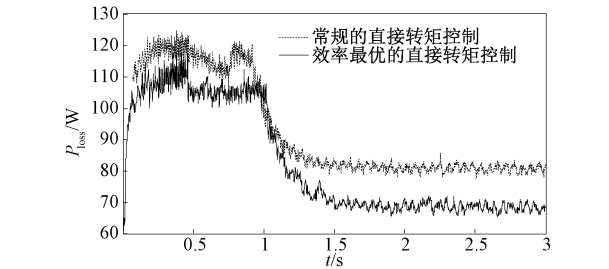


图6 两种控制方法的损耗比较

Fig. 6 Power loss comparison between two control systems

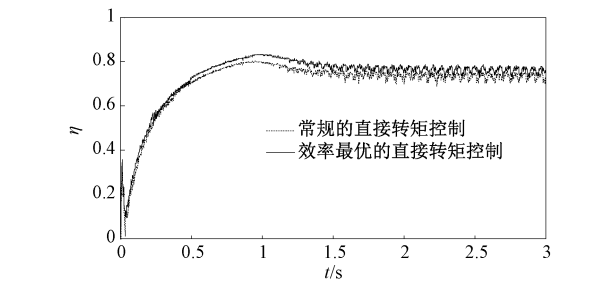


图7 两种控制方法的效率比较

Fig. 7 Efficiency comparison between two control systems

图8为转速一定 ($n_r = 800\text{r}/\text{min}$)、负载转矩 $0 \sim 5\text{N}\cdot\text{m}$ 变化, 电机运行达到稳态时, 两种直接转矩控制方法的效率比较图。实验中每隔 $0.5\text{N}\cdot\text{m}$ 进行一次测量, 数值为离散值。其中效率 η 由式(19)计

算:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T_e \omega_r}{V_{dc} I_{dc}} \quad (19)$$

式中,输入功率 $P_{in} = V_{dc} I_{dc}$,采用功率分析仪直接测量; V_{dc} 和 I_{dc} 分别为直流母线电压和电流。

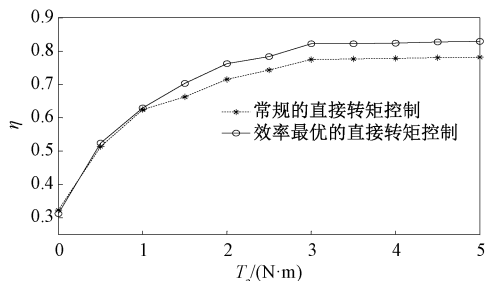


图8 两种控制方法在不同负载条件下的效率比较

Fig.8 Efficiency comparison under different load conditions

可以看出,在转速恒定条件下,轻载时,电机运行效率随电机输出转矩增大而增大,大于60%额定负载时,电机运行效率趋于稳定。总体上效率最优直接转矩控制的效率优于传统直接转矩控制,在满负荷时($T_e = 5\text{N}\cdot\text{m}$ 时),效率提高了约5%。

图9为转矩一定($T_e = 2\text{N}\cdot\text{m}$)、机械转速200~2000r/min变化,电机运行达到稳态时,两种直接转矩控制方法的效率比较图。实验中每隔200r/min测量一次,数值为离散值。可以看出,在输出转矩恒定条件下,电机在低速运行时,运行效率随电机转速增大而增大;在中、高速运行区,运行效率趋于稳定。总体上效率最优直接转矩控制的效率优于常规直接转矩控制,在中高速运行区,效率提高了约3%。

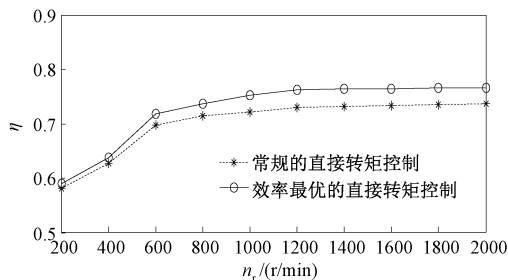


图9 两种控制方法在不同转速条件下的效率比较

Fig.9 Efficiency comparison under different speed conditions

6 结论

在分析内置式永磁同步电机损耗与转速和定子磁链关系的基础上,将一种基于损耗模型的效率最优控制方法引入常规的空间矢量直接转矩控制系统,提出了一种效率最优的内置式永磁同步电机直

接转矩控制方法。该方法可根据电机不同运行工况,动态调整定子磁链给定值,使电机损耗达到极小,运行效率最大,同时保持了常规直接转矩控制快速动态响应的特点。该方法在一些要求永磁同步电机驱动系统同时具备优良控制性能和高效率的场合有较好的应用前景。

参考文献 (References):

- [1] G Pellegrino, A Vagati, P Guglielmi, et al. Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (2): 803-811.
- [2] 杨耕, 耿华, 王焕钢 (Yang Geng, Geng Hua, Wang Huangang). 一种考虑感应电机动态效率的转矩控制策略 (A torque control strategy of induction motors taking efficiency of dynamic state into account.) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2005, 20 (7): 93-99.
- [3] F Azevedo, M Nasir Uddir. Recent advances in loss minimization algorithms for IPMSM drives [A]. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting [C]. Vancouver, Canada, 2014. 1-9.
- [4] Christos Mademlis, Iodanis Kioskeridis, Nikos Margaris. Optimal efficiency control strategy for interior permanent-magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19 (4): 715-723.
- [5] Junggi Lee, Kwanghee Nam, Seoho Choi, et al. Loss-minimizing control of PMSM with the use of polynomial approximations [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (4): 1071-1082.
- [6] Andreas Schramm, Hermann Lanfer. An offline optimization method for efficiency optimized operation of interior permanent magnet synchronous machines [A]. 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2011) [C]. Budapest, Hungary, 2011. 86-91.
- [7] 张立伟, 温旭辉, 郑琼林 (Zhang Liwei, Wen Xuhui, Zheng Qionglin). 异步电机用混合式模糊搜索效率优化控制研究 (Fuzzy logic based hybrid search control strategy for efficiency optimization control of induction motors) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2007, 27 (27): 83-87.
- [8] 张兴华, 孙振兴, 王德明 (Zhang Xinghua, Sun Zhenxing, Wang Deming). 电动汽车用感应电机直接转矩控制系统的效率最优控制 (Optimal efficiency control of direct torque controlled induction motor drives for electric

- vehicles) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (4): 255-260.
- [9] 张兴华, 孙振兴, 左厚贝 (Zhang Xinghua, Sun Zhenxing, Zuo Houbei). 感应电机空间矢量直接转矩控制系统的效率优化 (Efficiency optimization of direct torque controlled induction motor drives with space vector modulation) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2012, 32 (7): 52-55.
- [10] M Nasir Uddin, HonBin Zou, F Azevedo. Online loss-minimization-based adaptive flux observer for direct torque and flux control of PMSM drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52 (1): 425-431.
- [11] Calogero Cavallaro, Antonino Oscar Di Tommaso, Rosario Miceli, et al. Efficiency enhancement of permanent-magnet synchronous motor drives by online loss minimization approaches [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 52 (4): 1153-1160.
- [12] Katsumi Yamazaki. Torque and efficiency calculation of an interior permanent magnet motor considering harmonic iron losses of both the stator and rotor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (3): 1460-1463.
- [13] Fidel Fernandez-Bernal, Aurelio Garcia-Cerrada, Roberto Faure. Determination of parameters in interior permanent-magnet synchronous motors with iron losses without torque measurement [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37 (5): 1265-1272.

Optimal-efficiency direct torque control of interior permanent magnet synchronous motors

ZHANG Xing-hua, CHEN Peng-fei

(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University,
Nanjing 211816, China)

Abstract: In order to increase the efficiency of permanent magnet synchronous motor drives, an optimal-efficiency direct torque control of interior permanent magnet synchronous motors (IPMSM) is proposed. Firstly, the IPMSM model in the rotor reference frame is established considering iron losses. Then, the function relationship between the power losses and the electromagnetic torque, speed and stator flux linkage is analyzed in detail, and the expression to calculate stator flux amplitude which makes the power losses minimum is derived at different operation conditions. Consequently, the efficiency optimizing control for the direct torque controlled IPMSM drives is achieved by regulating the stator flux linkage reference. The experimental results show that the proposed control method not only preserves the fast torque dynamic response of the conventional direct torque control, but also improves the operation efficiency of the driving system.

Key words: interior permanent magnet synchronous motor; direct torque control; power loss model; efficiency optimization