

六相永磁同步发电机占空比模型预测 直接功率控制*

张鹏程, 许德志, 赵文祥, 晋世博
(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对传统六相永磁同步发电机(PMSG)单矢量模型预测直接功率控制(MPDPC)电流谐波大、有功和无功功率波动剧烈的问题,提出了一种占空比合成矢量MPDPC。通过对六相整流器的最大和中大电压矢量进行重构,获得12个合成矢量,实现了对谐波电流的有效抑制。在此基础上,提出在每个周期内同时作用一个合成矢量和零矢量,并根据有功和无功预测无差拍原理计算最优占空比,进一步抑制了有功和无功功率脉动。试验结果表明,所提占空比合成矢量MPDPC可以有效减少电流谐波和功率脉动。

关键词: 六相永磁同步发电机; 模型预测直接功率控制; 合成矢量; 占空比; 谐波抑制

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)01-0014-06

doi: 10.12177/emca.2020.183

Duty Cycle Model Predictive Direct Power Control for Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Generator*

ZHANG Pengcheng, XU Dezhi, ZHAO Wenxiang, JIN Shibo

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Large current harmonics and severe fluctuations occur in active and reactive power for single vector model predictive direct power control (MPDPC) of six-phase permanent magnet synchronous generator (PMSG). Aiming at these problems, a duty cycle synthetic vector MPDPC is proposed. By reconstructing the large and medium-large voltage vectors of the six-phase rectifier, twelve synthetic vectors are obtained, and the harmonic currents are effectively suppressed. On this basis, aiming at further suppressing the fluctuation of active and reactive power, a synthetic vector and a zero vector are used simultaneously in each cycle, and the optimal duty cycle is calculated according to the principle of deadbeat prediction of active and reactive power. Experimental results show that the proposed duty cycle synthetic vector MPDPC can effectively reduce current harmonics and power ripples.

Key words: six-phase permanent magnet synchronous generator (PMSG); model predictive direct power control (MPDPC); synthetic vector; duty cycle; harmonic suppression

0 引言

与三相电机相比,多相电机因其输出功率大、转矩脉动小、容错性能好等诸多优点,在电动汽

车、风力发电、航空航天、船舶推进等领域受到关注。目前,双三相永磁同步电机(PMSM)结合了永磁电机与多相电机的优势,是多相电机领域研究的热点之一^[1-4]。

收稿日期: 2020-09-09; 收到修改稿日期: 2020-11-28

* 基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2018107); 江苏大学高级人才科研启动基金项目(15JJD140)

作者简介: 张鹏程(1995—),男,硕士研究生,研究方向为永磁电机驱动及控制。

许德志(1979—),男,博士,副教授,研究方向为永磁电机驱动及控制。(通信作者)

赵文祥(1976—),男,博士,教授,研究方向为永磁电机驱动及控制。

矢量控制(VC)已经被广泛应用于双三相电机驱动系统^[5-6]。虽然其定子电流谐波可以被抑制,但通常需要复杂的坐标变换,而且控制器参数调试困难,动态特性差,对电机参数变化敏感。

直接转矩控制(DTC)由于其结构简单、瞬时响应快等优点,已广泛应用于三相电机系统并成功延伸到双三相电机系统^[7-9]。与三相电机相比,双三相电机可以获得更好的运行效果,但需考虑谐波电流和转矩脉动对电机运行的影响。文献[10]针对传统双三相电机电流谐波大的问题,通过重构空间电压矢量,得到12个合成矢量,有效抑制了电流谐波,但单个周期内只作用一个合成矢量,转矩脉动较大。文献[11-12]针对非对称六相感应电机转矩脉动大的问题,引入无差拍控制思想,在合成矢量的基础上,通过在单位周期内合理作用合成矢量和零矢量,进一步减小了转矩脉动。直接功率控制和DTC原理类似,广泛应用于三相脉宽调制(PWM)整流器^[13],但对于双三相发电机的直接功率控制报道较少。

模型预测控制凭借其优越的控制性能逐渐成为国内外学者研究的热点。文献[14]将模型预测控制引入双三相电机,提出了一种合成电压矢量的模型预测电流控制(MPCC)策略,该策略能够在—个采样周期内将2个合成矢量和2个零矢量合成一个具有最佳幅值和最佳相位的等效电压矢量,从而有效降低转矩脉动,减少电流谐波。文献[15]提出了一种模型预测直接转矩控制(MPDTC)策略,针对零序电流不为零的问题,引入零序电流控制策略,进一步减小了电机的转矩脉动,降低了定子电流谐波,提高了系统效率。

针对双三相永磁同步发电机(PMSG),本文提出了一种占空比合成矢量模型预测直接功率控制(MPDPC),通过对六相整流器的空间矢量进行重构,获得了12个新的合成矢量,有效抑制了发电机定子电流谐波。在此基础上,引入占空比控制,在每个周期内同时作用一个合成矢量和零矢量,进一步降低了系统的功率脉动。最后,通过试验验证了所提占空比合成矢量MPDPC的有效性。

1 传统 MPDPC

1.1 空间电压矢量

双三相PMSG是一个复杂的六维系统,利用

空间矢量分解(VSD)技术,可以将六维空间分解为3个二维的非耦合子空间: α - β 子空间、 z_1 - z_2 子空间、 o_1 - o_2 子空间。发电机的基本变量(电压、电流、磁通)和 $k=12m\pm 1$ ($m=1, 2, 3, \dots$)次谐波映射到 α - β 子空间, $k=6m\pm 1$ ($m=1, 3, 5, \dots$)次谐波映射到 z_1 - z_2 子空间, $k=3m$ ($m=1, 3, 5, \dots$)的零序分量映射到 o_1 - o_2 子空间中。其中,只有 α - β 子空间参与发电机能量变换,其余2个子空间不参与能量变换。此外,PMSG的2套绕组中性点隔离,映射在 o_1 - o_2 子空间的矢量大小为零,因此不需要考虑 o_1 - o_2 子空间。六相PMSG整流系统在 α - β 、 z_1 - z_2 子空间的电压矢量如图1所示。

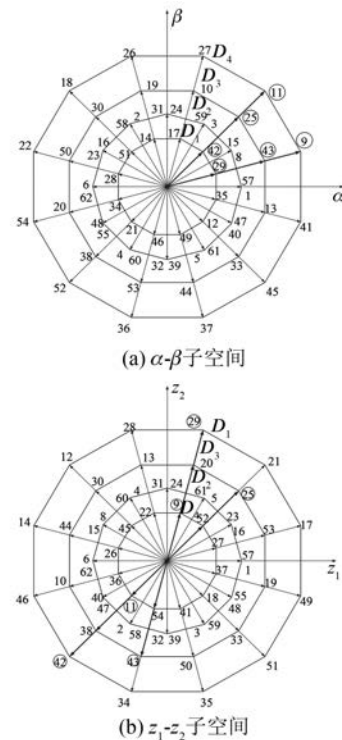


图1 整流器在2个子空间的电压矢量

由图1可知,根据幅值不同,将 α - β 子空间的电压矢量分为4组,由外到内分别为大矢量(D_4)、中大矢量(D_3)、中矢量(D_2)、小矢量(D_1)。比较图1(a)和图1(b)可知, α - β 子空间的大矢量映射到 z_1 - z_2 子空间变成小矢量,小矢量映射变成大矢量,大中矢量和中矢量映射后幅值不变,映射到 z_1 - z_2 子空间的矢量由外到内可以表示为 D_1 、 D_3 、 D_2 、 D_4 。

1.2 单矢量 MPDPC

六相PMSG的PWM整流系统拓扑结构如

图 2 所示。经过 Clarke 变换, 可得六相 PMSG 整流系统在 $\alpha\text{-}\beta$ 坐标系下数学模型为

$$\mathbf{E} = R\mathbf{i} + L \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \mathbf{V} \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} 、 \mathbf{V} 、 \mathbf{i} 分别为发电机反电动势矢量、整流侧电压矢量和发电机定子电流矢量; R 、 L 分别为发电机绕组电阻和电感。

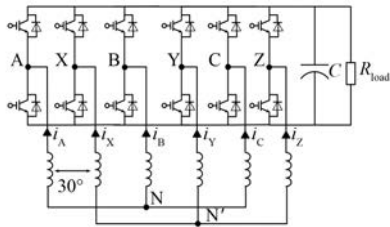


图 2 六相 PMSG 的 PWM 整流器拓扑结构

发电机侧的复功率 S 可以表示为

$$S = P + jQ = 3(\mathbf{E}\mathbf{i}^*) \quad (2)$$

式中: P 表示系统有功功率; Q 表示系统无功功率; $*$ 表示共轭。

在理想条件下, 发电机反电动势的微分可以表示为

$$\frac{d\mathbf{E}}{dt} = j\omega_e |\mathbf{E}| e^{j\omega_e t} = j\omega_e \mathbf{E} \quad (3)$$

式中: ω_e 为发电机的电角速度。

根据式(1)~式(3), 可以得出复功率的一阶微分方程为

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= 3 \left(\frac{d\mathbf{i}^*}{dt} \mathbf{E} + \frac{d\mathbf{E}}{dt} \mathbf{i}^* \right) = \\ &= 3 \left[j\omega_e \mathbf{E} \mathbf{i}^* + \frac{1}{L} (\mathbf{E}^* - \mathbf{V}^* - R\mathbf{i}^*) \mathbf{E} \right] = \\ &= \frac{1}{L} [3(|\mathbf{E}|^2 - \mathbf{V}^* \mathbf{E}) - (R - j\omega_e L)S] \quad (4) \end{aligned}$$

对式(4)的有功和无功进行分解, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} &= 3 \left(i_\alpha \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} + \frac{di_\alpha}{dt} \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} + \right. \\ &\left. i_\beta \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} E_\beta \\ -E_\alpha \end{bmatrix} + \frac{di_\beta}{dt} \begin{bmatrix} E_\beta \\ -E_\alpha \end{bmatrix} \right) \quad (5) \end{aligned}$$

对式(5)进行离散化得到:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P_{(k+1)} \\ Q_{(k+1)} \end{bmatrix} &= T_s \left(-\frac{R}{L} \begin{bmatrix} P_{(k)} \\ Q_{(k)} \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} -Q_{(k)} \\ P_{(k)} \end{bmatrix} + \right. \\ &\left. \frac{3}{L} \begin{bmatrix} |\mathbf{E}|^2 - \text{Re}(|\mathbf{E}|\mathbf{V}^*) \\ -\text{Im}(|\mathbf{E}|\mathbf{V}^*) \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} P_{(k)} \\ Q_{(k)} \end{bmatrix} \quad (6) \end{aligned}$$

式中: T_s 为系统的控制周期; Re 表示求取实部; Im 表示求取虚部。

单矢量 MPDPC 选取 $\alpha\text{-}\beta$ 子空间 D_4 层矢量, 代入功率模型进行预测, 通过代价寻优, 在单位周期内输出最优电压矢量。但是, 该方法没有考虑谐波子空间, 因此定子电流的谐波较大。

2 占空比合成矢量 MPDPC

2.1 空间矢量合成

由于单矢量 MPDPC 只考虑功率变化的 $\alpha\text{-}\beta$ 子空间, 存在发电机定子电流谐波大, 功率脉动大的问题。需要进一步考虑 $z_1\text{-}z_2$ 子空间对谐波电流的影响。分析 $\alpha\text{-}\beta$ 子空间和 $z_1\text{-}z_2$ 子空间矢量的对应关系, 采用合成矢量的方法可以使 $z_1\text{-}z_2$ 子空间电压矢量幅值为零, 从而有效减少电流谐波。从图 1(a) 可以看出, 矢量 \mathbf{V}_{29} 、 \mathbf{V}_{43} 、 \mathbf{V}_9 在 $\alpha\text{-}\beta$ 子空间具有相同的方向, 这表明该方向的中大矢量、小矢量和矢量具有相同的效果, 只是幅值不同, 作用强度不一致。当这 3 个矢量映射到 $z_1\text{-}z_2$ 子空间时, 如图 1(b) 所示, \mathbf{V}_{43} 和其余 2 个矢量 \mathbf{V}_{29} 、 \mathbf{V}_9 具有相反的方向, 表明 \mathbf{V}_{43} 和其余 2 个矢量的作用效果是相反的。为了减少谐波电流在 $z_1\text{-}z_2$ 子空间内的流动, 选取作用效果相反的 D_4 和 D_3 层矢量, 施加不同的作用时间, 可以使合成矢量在 $z_1\text{-}z_2$ 子空间幅值为零, 从而减少由谐波子空间电压矢量引起的谐波电流。 D_4 和 D_3 层矢量在 $z_1\text{-}z_2$ 子空间幅值分别为

$$\begin{cases} |\mathbf{V}_{D_4}| = 2M \cos 75^\circ = \frac{\sqrt{6} - \sqrt{2}}{2} M \\ |\mathbf{V}_{D_3}| = 2M \cos 45^\circ = \sqrt{2} M \end{cases} \quad (7)$$

式中: M 为合成矢量的幅值。

根据伏秒平衡原则, 在 $z_1\text{-}z_2$ 子空间对 D_4 和 D_3 层矢量作用时间 T_{D_4} 和 T_{D_3} 进行求解可得作用时间为

$$\begin{cases} T_{D_4} = (\sqrt{3} - 1) T_s \\ T_{D_3} = (2 - \sqrt{3}) T_s \end{cases} \quad (8)$$

如图 3 所示, 在 $\alpha\text{-}\beta$ 子空间组成了 12 个合成矢量, 将 12 个合成矢量代入功率模型, 通过评价函数在单位周期内选择出最优的合成矢量, 从而达到减少定子电流谐波的目的。

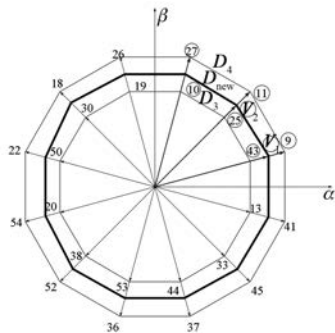


图 3 合成矢量图

2.2 占空比合成矢量 MPDPC

上述合成矢量 MPDPC 虽然考虑了电流谐波的影响,但有功功率和无功功率的脉动依然很大。为了解决功率脉动大的问题,本文提出了一种占空比合成矢量 MPDPC,通过在单位周期内同时作用合成矢量和零矢量,可以进一步降低有功功率和无功功率脉动。该方法的关键在于合成矢量和零矢量作用时间的分配。

在单位周期内同时作用合成矢量和零矢量的作用效果如图 4 所示。

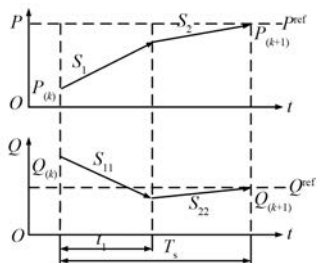


图 4 单位周期内有功无功典型波形图

图 4 中, $P_{(k)}$ 、 $P_{(k+1)}$ 和 $Q_{(k)}$ 、 $Q_{(k+1)}$ 分别为 k 时刻和 $k+1$ 时刻的有功和无功功率。其中,有功矢量和零矢量在一个周期内的斜率分别为 S_1 和 S_2 ,无功矢量和零矢量在一个周期内的斜率分别 S_{11} 和 S_{22} 。合成矢量的持续时间为 t_1 ,作用周期为 T_s 。在 $k+1$ 时刻控制 $P_{(k+1)}$ 和 $Q_{(k+1)}$ 的值等于 P^{ref} 和 Q^{ref} ,从而实现有功功率和无功功率的无差拍控制。

根据图 4,可将 $k+1$ 时刻的有功功率和无功功率表示为

$$\begin{cases} P_{(k+1)} = P_{(k)} + S_1 t_1 + S_2 (T_s - t_1) \\ Q_{(k+1)} = Q_{(k)} + S_{11} t_1 + S_{22} (T_s - t_1) \end{cases} \quad (9)$$

为了得到合成矢量作用时间,构建使有功和无功功率误差最小化的价值函数:

$$J = (P^{ref} - P_{(k+1)})^2 + (Q^{ref} - Q_{(k+1)})^2 \quad (10)$$

对式(10)求偏导,解得合成矢量的作用时间为

$$t_1 = \frac{(P^{ref} - P_{(k)})(S_1 - S_2)}{(S_1 - S_2)^2 + (S_{11} - S_{22})^2} + \frac{(Q^{ref} - Q_{(k)})(S_{11} - S_{22})}{(S_1 - S_2)^2 + (S_{11} - S_{22})^2} + \frac{T_s(S_2^2 + S_{22}^2 - S_1 S_2 - S_{11} S_{22})}{(S_1 - S_2)^2 + (S_{11} - S_{22})^2} \quad (11)$$

其中, S_1 、 S_2 、 S_{11} 、 S_{22} 由式(9)可计算得到。需要注意的是,如果 $t_1 > T_s$ 或者 $t_1 < 0$,表示仍处于动态过程,此时整个控制周期应输出有效矢量而不是输出零矢量,以维持系统的动态响应。

占空比合成矢量 MPDPC 控制框图如图 5 所示。与合成矢量 MPDPC 相比,占空比合成矢量 MPDPC 通过在单位周期内同时作用合成矢量和零矢量,将固定幅值的合成矢量转化为幅值可变的合成矢量,提升了矢量选择的自由度,降低了功率脉动。

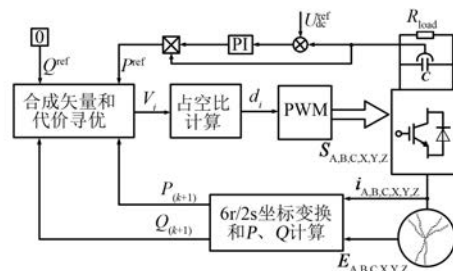


图 5 占空比合成矢量 MPDPC 控制框图

3 试验结果

为了验证所提占空比合成矢量 MPDPC 的正确性和有效性,搭建六相 PMSG 整流系统的试验平台,如图 6 所示。六相发电机由原动机经过连接器拖动,六相发电机连接整流器为负载供电。其中,整流器由驱动板和控制板组成,驱动板是六相整流桥,控制板以 TMS320F28377 为主控芯片向驱动器提供驱动信号。六相 PMSG 和整流器参数如表 1 所示。

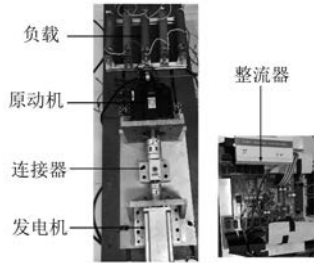


图6 六相 PMSG 试验平台

表1 六相 PMSG 和整流器参数

参数名称	参数值
定子电阻 R/Ω	0.7
绕组电感 L/mH	2.46
极对数 p	5
转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	700
直流母线电压 U_{dc}/V	80
负载电阻 R_{load}/Ω	20
开关频率 f/kHz	10
采样周期 $T_s/\mu s$	100

图7为320W负载时合成矢量MPDPC的试验波形。图7(a)中,从上到下分别为直流母线电压、发电机A相电流和发电机A相电压;图7(b)中,从上到下分别为有功功率和无功功率。从图7(a)可以看出,虽然采用合成矢量MPDPC能够保证直流母线电压稳定在80V,但是直流母线电压纹波较大。此外,由图7(b)可知,有功功率和无功功率均有很大的脉动。

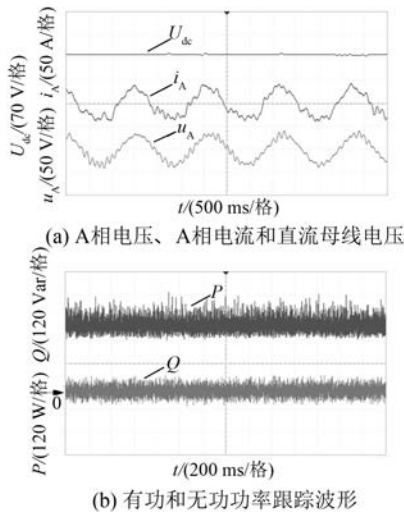


图7 合成矢量 MPDPC 试验波形

图8为320W负载时占空比合成矢量MPDPC

的试验波形。从图8(a)可以看出,直流母线电压能够很好地稳定在80V。此外,由图8(b)也知,有功功率在320W上下波动,无功功率在零上下波动,且有功功率和无功功率脉动较小。

对比2种控制策略可知,合成矢量MPDPC虽然可以降低电流谐波,但有功功率和无功功率波动较大,从而导致直流母线电压波动较大。采用占空比合成矢量MPDPC可以有效降低有功功率和无功功率的脉动,减少发电机定子电流谐波,提高直流母线电压的稳定性。

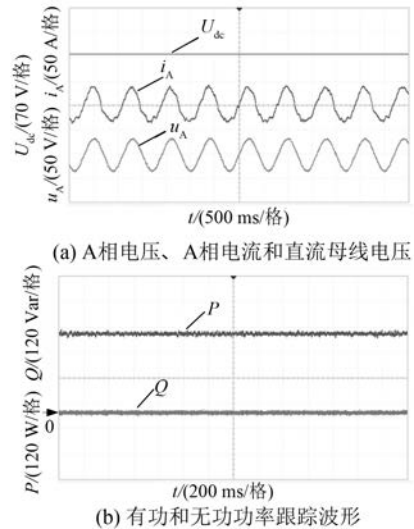


图8 占空比合成矢量 MPDPC 试验波形

4 结 语

本文针对六相PMSG传统MPDPC电流谐波含量高、功率脉动大的问题,提出了一种占空比合成矢量MPDPC。该算法在合成空间矢量的基础上,引入无差拍占空比调制的方法,有效减小了定子电流谐波,降低了整流系统功率脉动。最后,通过试验验证了所提控制算法的有效性。

【参考文献】

[1] XUE S, WEN X, FENG Z. Multiphase permanent magnet motor drive system based on a novel multiphase SVPWM [C] // 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006.

[2] ZHOU Y, CHEN G. Predictive DTC strategy with fault-tolerant function for six-phase and three-phase

- PMSM series-connected drive system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 9101.
- [3] 高宏伟,杨贵杰,刘剑. 三次谐波注入式五相永磁同步电机矢量控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4101.
- [4] 高闯,赵文祥,吉敬华,等. 低谐波双三相永磁同步电机及其容错控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 124.
- [5] 孟超,欧阳红林,刘伟候,等. 双 Y 移 30° 永磁同步电机的空间矢量调制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 90.
- [6] TAHERZADEH M, JOORABIAN M, CARRIERE S, et al. Speed adaptive flux Luenberger observer used in sensorless vector control of an unbalanced six-phase induction machine[C]//The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014), 2014.
- [7] BUJA G S, KAZMIERKOWSKI M P. Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors; a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 744.
- [8] ZAREAN N, KAZEMI H. A new DTC control method of doubly fed induction generator for wind turbine[C]//2012 Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, 2012.
- [9] WANG X, WANG Z, LIU P, et al. A hybrid direct torque control scheme for asymmetric six-phase PMSM drives[C]//IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017.
- [10] REN Y, ZHU Z Q. Enhancement of steady-state performance in direct-torque-controlled dual three-phase permanent-magnet synchronous machine drives with modified switching table[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3338.
- [11] PANDIT J K, AWARE M V, NEMADE R V, et al. Direct torque control scheme for a six-phase induction motor with reduced torque ripple [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 7118.
- [12] 孙丹,方扬,孙士涛,等. 双馈异步风力发电机无差拍直接功率控制及延时补偿[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 70.
- [13] DATTA R, RANGANATHAN V T. Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(3): 390.
- [14] YUAN L, WEI K, HU B, et al. Current control method with enhanced PI controller for six-phase PM synchronous motor drive[C]//2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016.
- [15] 陈光团,周扬忠. 六相串联三相双永磁同步电机预测型直接转矩控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4526.

~~~~~

(上接第 7 页)

- [ 48 ] 马伟明. 电力集成技术[ J ]. 电工技术学报, 2005, 20( 1 ): 16.
- [ 49 ] 李洪文,邓永停,王建立. 永磁同步电机速度控制器的全数字化集成[ J ]. 光学精密工程, 2015, 23( 4 ): 1105.
- [ 50 ] 王东,靳栓宝,魏应三,等. 集成电机推进装置应用综述[ J ]. 中国电机工程学报, 2020, 40( 11 ): 3654.
- [ 51 ] LILLO L D, AHMADI B, EMPRINGHAM L, et al. Next generation integrated drive, NGID: a novel approach to thermal and electrical integration of high power density drives in automotive applications[ C ]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition ( ECCE ), 2018.
- [ 52 ] 蔡骏,邓智泉. 一种具有容错功能的开关磁阻电机无位置传感器控制方法[ J ]. 中国电机工程学报, 2012, 32( 36 ): 109.