

文章编号:1000-582X(2011)11-094-06

可调直流母线电压永磁电机矢量控制策略

王明渝,肖达正

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400030)

摘要:针对电动汽车电力驱动系统中采用固定直流母线电压的驱动方式存在直流电压利用率低、电机电流纹波大的不足,研究了适用于电动汽车的可调直流母线电压永磁电机矢量控制策略。根据逆变器参考电压矢量幅值,采用双向 DC/DC 变换器实时调节直流母线电压的方法,改善矢量控制系统整体性能。最后利用 MATLAB 对永磁电机新型矢量控制策略进行了仿真,仿真结果表明可调直流母线电压永磁电机矢量控制系统能有效地提高直流电压利用率,减小转矩脉动,改善电机电流波形,减小电机电流总谐波畸变率,证明了该控制策略的有效性和可行性。

关键词:电动汽车;双向 DC/DC;电压利用率;矢量控制;永磁电机;谐波

中图分类号:TM351

文献标志码:A

Vector control of permanent magnet synchronous motor with variable DC-link voltage

WANG Ming-yu, XIAO Da-zheng

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: As for the drive of control system in electric vehicles, if the inverter power is supplied by a constant DC-link voltage, there are some disadvantages in the system, such as small utilization of the voltage, big current harmonic distortion of the motor windings. A new strategy for vector control of permanent magnet synchronous motor (PMSM) with variable DC-link voltage is proposed, which is suitable for electric vehicles. According to the reference voltage amplitude of the inverter, the new system uses bidirectional DC/DC converter to adjust the DC-link voltage to improve the performance of the vector control system. At last, the whole system is simulated with MATLAB software. The simulation results show that the new strategy for vector control can increase voltage utilization, decrease torque ripple, improve current waveform effectively and decrease the total harmonic distortion of motor current. The results also verify the effectiveness and feasibility of the new strategy.

Key words: electric vehicles; bidirectional DC/DC; utilization rate of voltage; vector control; PMSM; harmonic

目前,由于世界能源日益枯竭以及环保问题非常突出,传统燃油汽车工业面临着巨大的挑战。电动汽车解决了燃油汽车污染及资源不可再生的问题,并且具有清洁、传动效率高等优点,电动汽车技

术成为了世界各国的研究热点^[1-4]。

永磁电机(PMSM)矢量控制技术具有力矩系数大、可靠性高、控制特性好等优点,能够很好地满足电动汽车低速启动转矩大、并且在高速运行时转矩变化

收稿日期:2011-06-15

基金项目:国家“111”计划资助项目(B08036)

作者简介:王明渝(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电力电子变换器、感应电动机矢量控制、电力电子系统仿真、人工智能控制等研究,(E-mail)ceemwang@cqu.edu.cn。

平稳的要求,适合于电动汽车电力驱动系统。在电动汽车电力驱动系统中,采用固定直流母线电压的驱动方式,会导致直流电压利用率低、电机电流纹波大、铁耗和开关损耗很大等问题。由于直流电压利用率与直流母线电压幅值成反比,电机电流纹波与加在电机输入端子上电压的瞬时值和电机反电动势之间的电压差值成正比,采用双向 DC/DC 变换器根据电机不同工况调整逆变器直流侧输入电压,可以提高直流电压利用率并减小电机电流波形的纹波^[5-6]。

为了提高电动汽车电力驱动系统性能,目前大多数研究都集中于各种双向 DC/DC 变换器新拓扑的研究^[7-10],对于采用双向 DC/DC 变换器根据电机不同工况如何调整逆变器直流侧输入电压的研究还很少。文献[11]采用直流母线电压自适应控制器以获得最优直流母线电压的方法,使逆变器开关频率最小化,但是逆变器开关管导通时间计算公式复杂,并且需要实时检测定子绕组反电动势,电机只能缺相运行,电机不能完全出力。文献[12]采用可调直流母线电压控制策略,减小了电机反电动势对于电机电流纹波的影响,改善了开关磁阻电机驱动系统性能。笔者根据逆变器参考电压矢量幅值,利用文献[5]的级联式双向 DC/DC 变换器实时调节直流母线电压,提高了逆变器直流电压利用率,减小了电机转矩脉动,改善了电机电流波形。

1 电压空间矢量脉冲宽度调制

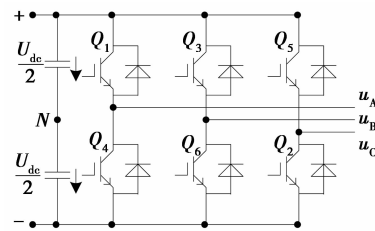
电压空间矢量脉冲宽度调制(SVPWM-VSI)广泛应用于高性能交流调速系统。传统 SVPWM-VSI 采用一个接近于电机额定电压作为直流母线电压,然而,逆变器参考电压会随着电机的不同工况发生很大变化,导致逆变器直流电压利用率小,逆变器输出电压谐波含量大,特别是当电机低速运行时,直流电压利用率会更小,输出电压谐波会进一步加大,会导致电机电流严重畸变,从而严重影响电机的运行性能。

1.1 逆变器直流电压利用率

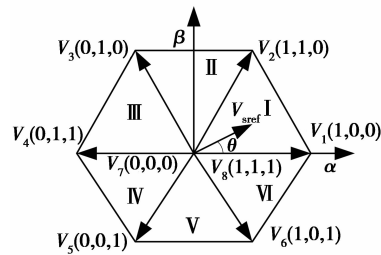
对于三相电压型逆变器,其电路如图 1(a)所示,电机的相电压依赖于它所对应的逆变器上下桥臂功率开关的状态。三相桥式电压型逆变器有 8 种工作状态,这 8 种状态用空间矢量图的概念来表示,如图 1(b)所示。其中, V_{1-8} 为基本电压矢量, V_{ref} 为参考电压矢量。由图 1 可见,要保持整个 360° 范围内都为线性调制, V_{ref} 幅值的最大值为六边形内切圆半径,即空间矢量脉冲宽度调制输出的相电压最大基波幅值为 $U_{\text{dc}}/\sqrt{3}$ 。由于不同文献对于直流电压利用率的定义不同,这里将直流电压利用率定义为输出线电压基波分量幅值与直流母线电压的比值,因此,在线性调制范围内 SVPWM-VSI 直流电压利用率为

$$\eta = \frac{U_{\text{AB1}}}{U_{\text{dc}}}, \quad (1)$$

式中: U_{AB1} 为逆变器输出线电压基波有效值; U_{dc} 为逆变器直流母线电压。可以看出,当变频调速系统稳态运行时, U_{AB1} 保持不变,在保持电机稳定运行前提下,有效降低直流母线电压,就可以达到提高直流电压利用率的效果。



(a) 三相电压型逆变电路



(b) 电压空间矢量

图 1 三相电压型逆变电路和电压空间矢量图

1.2 输出电压谐波分析

由于逆变器输出电压谐波幅值大小对电机电流谐波幅值有直接影响,会影响电机铁耗、温升以及转矩脉动,因此对 SVPWM 输出电压谐波分析是有必要的。文献[13]利用多重傅里叶级数分析了 SVPWM 输出电压谐波,计算比较复杂,文献[14]提出了一种简单的 SVPWM 谐波分析算法。当整个变频调速系统稳定运行时,可以认为参考电压矢量的幅值 V_{ref} 保持不变,载波比 $m_f = f_s/f$ 也保持恒定,分析逆变器输出电压谐波方法与文献[14]提出的分析方法类似。以逆变器 A 相与电容中点电压 u_{AN} 为例进行分析, u_{AN} 在半个输出周期内的展开图如图 2 所示,其傅里叶级数表达式如下:

$$u_{\text{AN}(t)} = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)]. \quad (2)$$

在一个调制波周期内,由于 u_{AN} 关于纵轴对称,因此公式(2)中的系数 a_0, b_n 均为 0,各次谐波幅值表达式为

$$a_n = \frac{2U_{\text{dc}}}{n\pi} \sum_{k=1}^{m_f/2} [\sin(n\omega t_{2k}) - \sin(n\omega t_{2k-1})]. \quad (3)$$

相电压总谐波畸变率为

$$\text{THD} = \frac{1}{a_1} \left(\sum_{n=2}^{+\infty} a_n^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

图 5 为直流母线电压控制器框图,根据电机工况切换双向 DC/DC 变换器的工作模式,当功率由蓄电池流向电机时规定为正方向,双向 DC/DC 变换器 4 种工作模式为:1)正向降压模式,开关管 VT₁ 斩波,VT₂ 截止,VT₃ 截止,VT₄ 截止;2)正向升压模式,开关管 VT₁ 保持恒通,VT₂ 截止,VT₃ 斩波,VT₄ 截止;3)反向降压模式,开关管 VT₁ 截止,VT₂ 截止,VT₃ 截止,VT₄ 斩波;4)反向升压模式,开关管 VT₁ 截止,VT₂ 斩波,VT₃ 截止,VT₄ 保持恒通。根据功率流动的方向判断稳压侧,即能量由电池流向电机时, u_{dc} 侧稳压输出;能量由电机流向电池时, u_{in} 侧稳压输出。其中, i_L 为双向 DC/DC 变换器电感电流, u_{deref} 为双向 DC/DC 变换器正向工作时电压参考值, u_{inref} 为双向 DC/DC 变换器反向工作时电压参考值。

电动汽车在运行过程中,由于受到蓄电池比功率的限制,使得其电压会随着汽车的运行而降低。为了使电机及各个辅助设备不受电压变化的影响,就要对电池输出电压进行控制,稳定输出电压。为了将级联式 Buck-Boost 双向 DC/DC 输出电压稳定在一个相对较高的电压上,对此变换器进行双闭环控制,电压及电流控制器均采用 PI 调节器。其中 FG 的表达式为

$$u_{deref} = u_{min} + \frac{3}{2} \sqrt{u_{s\alpha ref}^2 + u_{s\beta ref}^2} \quad (9)$$

蓄电池输出电流参考值为

$$i_{ref} = k_{pv} \Delta u + k_{iv} \int \Delta u dt \quad (10)$$

开关管占空比参考值为

$$d_{ref} = k_{pi} \Delta i + k_{ii} \int \Delta i dt \quad (11)$$

式中: u_{deref} 为双向 DC/DC 变换器正向工作时电压参考值; u_{min} 是为了保证整个调速系统稳定运行的最小电压值; u_{sαref}, u_{sβref} 为 αβ 轴系下定子电压参考值; i_{ref} 为蓄电池输出电流参考值; d_{ref} 为开关管占空比参考

值; k_{pv} 为电压 PI 调节器比例常数; k_{iv} 为电压 PI 调节器积分常数; k_{pi} 为电流 PI 调节器比例常数; k_{ii} 为电流 PI 调节器积分常数。

根据公式(9),双向 DC/DC 变换器可以根据电机不同工况自动调节逆变器直流侧输入电压,达到提高直流电压利用率,改善电机电流波形,减小转矩脉动的目的。

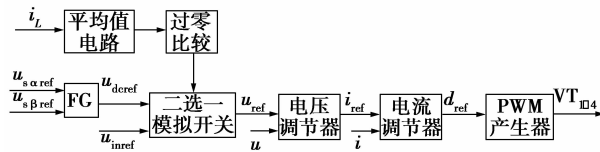
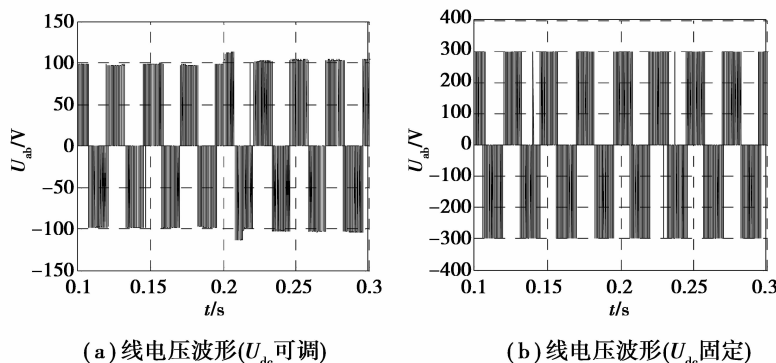


图 5 直流母线电压控制器框图

3 仿真研究

为了验证可调直流母线电压 PMSM 矢量控制系统的性能,在 MATLAB/Simulink 下进行了仿真研究,包括该系统在不同负载条件下的转矩阶跃响应和定子电流响应等。仿真模型如图 4 所示,所采用永磁同步电机参数为:额定转矩 T_e = 10 N·m,额定转速 n_N = 2 300 r/min,额定直流母线电压 V_N = 300 V,定子电阻 R_s = 0.457 8 Ω,定子电感 L_{sd} = L_{sq} = 0.003 34 H,转子磁链幅值 ψ_F = 0.171 Wb,转动惯量 J = 0.001 469 kg·m²,极对数为 4; SVPWM 开关频率设定为 10 kHz。双向 DC/DC 变换器参数为:输入电压 48 V,电感 L = 0.1 mH,电容 C₁ = C₂ = 470 μF,开关频率 f = 15 kHz。

图 6 比较了可调直流母线电压与直流母线电压固定为 300 V 时, SVPWM 输出线电压波形、相电流波形及电流谐波分析。设定转速为 600 r/min, t = 0 s 空载启动,在 t = 0.2 s 时刻突加负载,电机负载转矩由 0 N·m 突变到 6 N·m, t = 0.4 s 时刻负载转矩由 6 N·m 突减到 2 N·m。



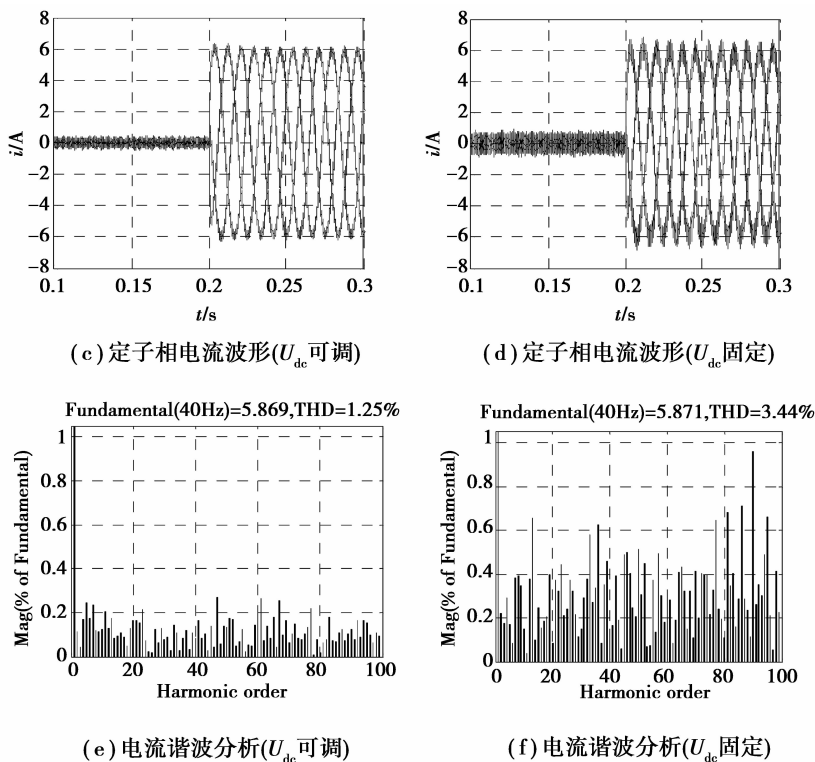
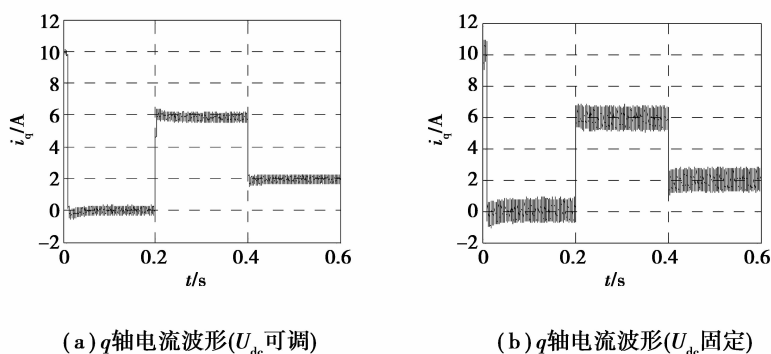


图 6 SVPWM 输出线电压、相电流波形及电流谐波分析

图 6(a), (b) 为 SVPWM 输出线电压波形, 由于在 $t=0.2$ s 时电机负载转矩由 0 突加到 $6 \text{ N} \cdot \text{m}$, 定子电流增大, 因此采用可调直流母线电压驱动时, 线电压幅值增加, 增强了系统的抗负载扰动性能。结合式(1), 可以计算出, 直流电压利用率由固定直流母线电压时约 26.52% 提高到约 79.56%。图 6(c)-(d) 为定子相电流波形, 采用可调直流母线电压驱动时, 定子相电流更加接近于正弦波, 电机电流纹波减小。图 6(e)-(f) 为定子电流谐波分析, 其中横轴为谐波次数, 纵轴为各次谐波幅值占基波幅值的百分比, 可以看出, 采用可调直流母线电压驱动方式时, 各次谐波幅值均有所减小, 相电流总谐波畸变

率由 3.44% 减小到 1.25%, 有利于减小电机铁耗, 减小电机温升和电磁转矩脉动。

图 7 比较了可调直流母线电压与直流母线电压固定为 300 V 时, dq 轴电流波形和转矩波形。对比 q 轴电流波形(a)-(b)可以看出, 采用可调直流母线电压驱动 PMSM 矢量控制系统, q 轴电流脉动由约 1 A 减小到约 0.4 A, 这有利于转矩脉动的减小, 从图 7(e)-(f) 转矩响应曲线就可以明显看出, 转矩脉动范围由约 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 下降到约 $0.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。对比 d 轴电流波形(c)-(d)可以看出, d 轴电流脉动由约 1.4 A 下降到约 0.9 A, 有利于磁链脉动减小。



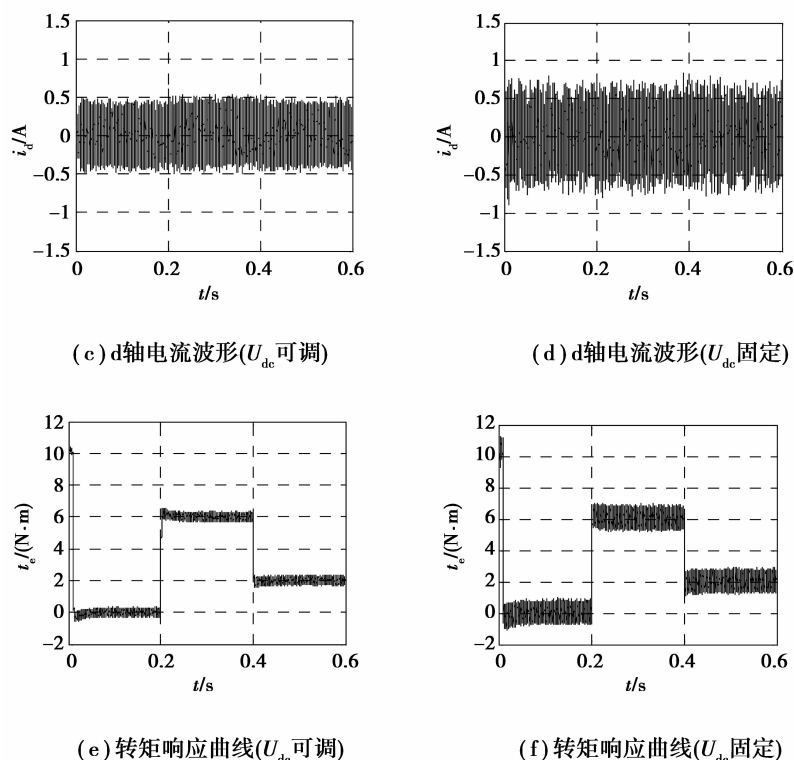


图 7 电机 dq 轴电流和转矩响应

4 结 语

笔者研究了可调直流母线电压永磁电机矢量控制系统,与固定直流母线电压的驱动方式相比,仿真结果表明该方法具有以下优点:1)逆变器直流电压利用率高;2)电机电流纹波小,转矩脉动小;3)高次电流谐波幅值小,电机铁耗小。研究结果对提高电动汽车电力驱动系统性能具有重要的意义。

参考文献:

[1] 李珂,张承慧,催纳新. 电动汽车电驱动系统高速区快响应控制策略[J]. 电工技术学报,2009,22(6):41-47.
LI KE,ZHANG CHENG-HUI,CUI NA-XIN. Study of high dynamic response strategy for electric vehicle drive system in the high-speed region[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,22(6):41-47.

[2] 冉振亚,周智庆,李越,等. 电动汽车 CAN 总线驱动控制系统设计[J]. 重庆大学学报,2008,31(6):603-609.
RAN ZHEN-YA, ZHOU ZHI-QING, LI YUE, et al. A controller area net work-based electric vehicle drive system design [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(6):603-609.

[3] LI F Q, WANG J, LIU Z D. On the vehicle stability control for electric vehicle based on control allocation [C]//Proceedings of IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion, September 3-5, 2008, Harbin, China:

[S. 1.],2008:1-6.

[4] ZHOU N H, XIE H, YAN Y, et al. Development of powertrain controller platform for electric vehicles based on abstraction layer structure[C]// Proceedings of IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion, September 3-5, 2008, Harbin, China: [S. 1.], 2008: 1-4.

[5] 张晓峰,吕征宇. 混合动力车用全数字电流控制型双向 DC/DC 变换器[J]. 电工技术学报,2009,24(8):84-89.
ZHANG XIAO-FENG, LU ZHENG-YU. Digital-current-controlled bi-directional DC/DC converter in the hybrid electric vehicle [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(8):84-89.

[6] 杨贵杰,孙洪周,洪雷. 变频调速 PMSM 系统电源最大利用率分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(11): 1785-1839.
YANG GUI-JIE, SUN HONG-ZHOU, HONG LEI. Analysis of the maximum utilization of DC power supply for PMSM system [J]. Journal of Harbin institute of technology,2008,40(11):1785-1839.

[7] 童亦斌,吴峰,金新民,等. 双向 DC/DC 变换器的拓扑研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(13):81-86.
TONG YI-BIN, WU TONG, JIN XIN-MIN, et al. Study of bi-directional DC/DC converter [J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27 (13): 81-86.

- Barcelona: [s. n.], 2007: PO-39.
- [5] 徐会军, 朱超. 煤层气在我国能源中的地位及开发利用现状和前景[J]. 中国煤炭, 2001, 27(12): 32-36.
XU HUI-JUN, ZHU CHAO. Coalbed methane: role in China's energy structure, present status and future prospects of development and utilization [J]. China Coal, 2001, 27(12): 32-36.
- [6] 付永兴, 李化治, 郭桂彬, 等. 煤层气液化装置流程及经济性分析[J]. 低温与特气, 2004, 22(4): 10-13.
FU YONG-XING, LI HUA-ZHI, GUO GUI-BIN, et al. The economic analysis of the coalbed methane liquefaction equipments [J]. Low Temperature and Special Gases, 2004, 22(4): 10-13.
- [7] 林文胜, 顾安忠, 朱刚. 天然气液化装置的流程选择[J]. 真空与低温, 2001, 7(2): 105-109.
LIN WEN-SHENG, GU AN-ZHONG, ZHU GANG. Selection for the process for liquefaction plants of natural gas [J]. Vacuum and Cryogenics, 2001, 7(2): 105-109.
- [8] 蒲亮, 孙善秀, 程向华, 等. 几种典型的煤层气液化流程计算及分析比较[J]. 化学工程, 2008, 36(2): 54-58.
PU LIANG, SUN SHAN-XIU, CHENG XIANG-HUA, et al. Calculations and energy analysis on several kinds of liquefaction processes of natural gas[J]. Chemical Engineering (China), 2008, 36(2): 54-58.
- [9] 蒲亮, 孙善秀, 厉彦忠, 等. 带膨胀机的煤层气液化流程计算及热力学分析[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(9): 1115-1118.
PU LIANG, SUN SHAN-XIU, LI YAN-ZHONG, et al. Calculation and thermodynamic analysis on liquefaction processes of natural gas with expanders [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(9): 1115-1118.
- [10] 范庆虎, 李红艳, 尹全森, 等. 低浓度煤层气液化技术及其应用[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 117-120.
FAN QING-HU, LI HONG-YAN, YI QUAN-SEN, et al. Liquefaction technology on low-concentration CBM and its application [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 117-120.
- [11] 陶鹏万. 煤矿区煤层气低温分离液化工艺功耗分析[J]. 中国煤层气, 2009, 6(1): 37-41.
TAO PENG-WAN. Analysis of power consumption of the liquefaction technology for separation of CMM at low temperature[J]. China Coalbed Methane, 2009, 6(1): 37-41.
- [12] 孙恒, 朱鸿梅, 舒丹. 一种低浓度煤层气低温液化分离工艺的模拟与分析[J]. 低温技术, 2009, 37(8): 21-23.
SUN HENG, ZHU HONG-MEI, SHU DAN. Simulation and analysis of a liquefaction and separation process of low concentration CBM[J]. Cryogenics, 2009, 37(8): 21-23.

(编辑 郑洁)

~~~~~

(上接第99页)

- [8] GARCIA O, FLORES L A, OLIVER J A, et al. Bi-directional DC/DC converter for hybrid vehicles [C]// Proceedings of IEEE Conference on Power Electronics Specialists, June 16, 2005, Recife, Brazil: [S. l.], 2006:1881-1886.
- [9] INOUE S, AKAGI H. Voltage control of a Bi-directional isolated DC/DC converter for medium-voltage motor drives [C]// Proceedings of IEEE Conference on Power Conversion, April 2-5, 2007, Nagoya, Japan: [S. l.], 2007:1244-1250.
- [10] LEE W K, KWON T, LEE J, et al. A design of DC link voltage according to power loss of inverter and motor in hybrid vehicle [C]// Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Telecommunications Energy Conference, October 18-22, 2009, Incheon, Korea: [S. l.], 2009:1-3.
- [11] PAN C T, CHEN T C, HONG Y H, et al. A new DC-link converter for induction motor drives [J]. Energy Conversion, 1995, 10(1): 71-77.
- [12] CHAI J Y, LIAW C M. Development of a switch-reluctance motor drive with PFC front end [J]. Energy Conversion, 2009, 24(1): 271-280.
- [13] MOYNIHAN J F, EGAN M G, MURPHY J M D. Theoretical spectra of space-vector-modulated waveforms [J]. Electric Power Applications, 1998, 145(1): 17-24.
- [14] 陈瑶, 童亦斌, 金新民. 基于PWM整流器的SVPWM谐波分析新算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 76-80.  
CHEN YAO, TONG YI-BIN, JIN XIN-MIN. A novel algorithm of SVPWM harmonic analysis based on PWM rectifier [J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(13): 76-80.
- [15] VAS P. Sensorless vector and direct torque control [M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.

(编辑 王维朗)