

文章编号: 0253-9993(2009)11-1563-06

新型开关磁阻电机驱动系统软开关功率 变换器原理分析与仿真

孟润泉, 王振民, 许春雨

(太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 通过在直流电源与不对称半桥式开关磁阻电机功率电路间插入一种准谐振直流环节, 给每个相开关并联电容, 构成新型开关磁阻电机软开关功率变换器主电路. 该电路控制简单且能够实现变换器中全部功率器件的软开关操作. 在介绍变换器主电路拓扑及特点基础上, 深入分析了其软开关原理, 并通过仿真实验验证了该电路方案的可行性及原理分析的正确性.

关键词: 开关磁阻电机 (SRM); 功率变换器; 软开关; 准谐振直流环
中图分类号: TM352 文献标识码: A

Principle analysis and simulation of a novel soft-switching converter for switched reluctance motor drive

MENG Run-quan, WANG Zhen-min, XU Chun-yu

(College of Electric and Dynamic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A brand-new soft-switching converter for SRM was proposed, which was made up of a kind of quasi resonant DC link circuit (QRDCL) and the classic asymmetry bridge SRM converter modified by adding a shunt-wound capacitance per phase switch device. All power switch devices of the proposed converter were able to operate in soft-switching mode. Based on introducing the structure and characteristics of the converter circuit, the soft-switching operating principle of the circuit was analyzed. Simulation experiment results show that circuit scheme is feasible and principle analysis is correct.

Key words: switched reluctance motor (SRM); converter; soft-switching; quasi resonant DC link

开关磁阻电机 (SRM) 具有起动转矩高、调速范围宽、响应速度快、可控参数多、结构简单、坚固耐用等突出优点, 尤其适于驱动煤矿井下的电机车、胶带输送机、提升绞车和局部通风机等机电设备^[1-3]. 然而, 转矩脉动和噪声等缺陷严重影响了开关磁阻电机驱动系统 (SRD) 的推广应用. 从系统整体出发, 利用先进控制手段是消除 SRD 系统转矩脉动和噪声的一种途径, 而任何控制策略都必须通过对电机绕组电流和磁链的精准调节来实现, 这就要求提高 SRD 功率变换器的工作频率, 以提高 SRD 系统动态响应速度^[4]. 另一方面, 开关损耗、电磁干扰 (EMI) 会随着功率器件开关频率的增加而增大, 从而使系统效率降低, 整体性能下降. 软开关技术是降低功率器件开关损耗和抑制 EMI 的有效手段, 已在开关电源及异步电机传动领域获得较高水平的发展^[5-8], 出现了诸如辅助谐振换流极 (ARCP)^[9]、辅助准谐振直流环 (AQRDCL)^[10]、有源箝位谐振直流环 (ACRDCL)^[11] 等一些典型的电路拓扑. 但由于 SRD 系统与异步电机变频调速系统从功率电路的结构到换流规律都有着显著的不同^[12], 限制了上述典型电路拓扑

等软开关研究成果在 SRD 系统中的直接应用. 本文提出一种能够实现 SRD 功率变换器中全部开关器件软开关动作的主电路方案, 该电路由一个准谐振直流环节和改进的不对称半桥式 SRD 功率变换电路组成.

1 主电路结构和特点

新型 SRD 软开关功率变换器主电路拓扑结构如图 1 所示, 图中虚线框外是改进的不对称半桥式 SRD 功率电路, 其中, L_a, L_b, L_c 分别为 SRM 的三相绕组; $V_1 \sim V_6$ 为相开关; $D_1 \sim D_6$ 为各相绕组的续流二极管, 与传统不对称半桥式功率电路的不同之处是每个相开关功率器件分别并联了一个电容器, 即 $C_1 \sim C_6$. 因电容电压不能突变, 所以相开关 $V_1 \sim V_6$ 在任何时刻关断均为零电压软关断. 虚线框 A、B 内部是由平波电容 C_{d1}, C_{d2} 、谐振电容 C_r 、谐振电感 L_r 、辅助开关管 V_{C1}, V_{C2}, V_{C3} 及二极管 D_{C1}, D_{C2}, D_{C3} 构成的准谐振直流环节电路. 其中虚线框 A 中电路应用于软开关 PWM 逆变器中时, 其电感 L_r 可与后续的 DC/AC 逆变电路中的功率开关、续流二极管及等效电容配合实现谐振^[13], 从而形成谐振槽. 但 SRD 功率电路从结构到运行原理都与变频调速系统中 DC/AC 逆变电路存在很大差异, 不能直接和虚线框 A 中电路配合完成谐振, 因此增加了虚线框 B 中的谐振电容 C_r 、辅助开关 V_{C3} 及二极管 D_{C3} , 以协助谐振顺利进行.

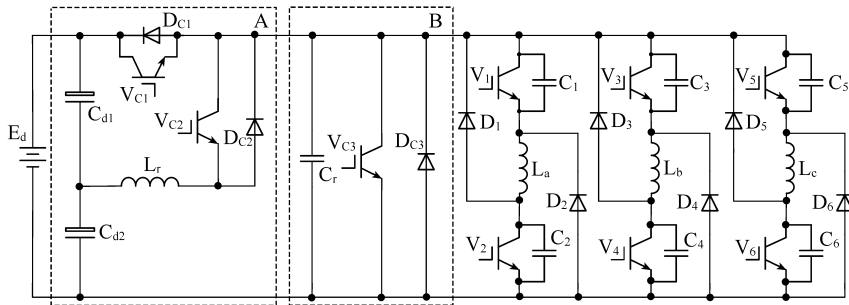


图 1 新型 SRD 软开关功率变换器主电路

Fig. 1 The main circuit structure of novel SRD soft-switching converter

与现有 SRD 软开关功率电路相比, 本电路具有以下特点: ① 与文献 [4] 所述电路相比, 本电路中谐振电感 L_r 不在直流母线上串联, 电源的能量无需经 L_r 向 SRM 供出, L_r 仅作为谐振过零时的储能元件, 故其本身的损耗很小; ② 与文献 [14 - 15] 提出的电路相比, 本电路方案中相开关功率器件在任何时候关断均属零电压关断, 只需控制准谐振直流环节为相开关的零电压开通提供谐振槽即可, 不仅简化了控制, 同时也提高了母线电压的利用率.

2 工作原理

依据准谐振直流环节在 DC/AC 逆变器中运行机理的数学解析^[13], 结合 SRD 功率变换器的特殊情况对新型 SRD 软开关功率电路的软开关原理进行分析. 由于平波电容 C_{d1}, C_{d2} 容量很大且相等, 可近似认为其连接处电位保持 $E_d/2$ 不变; 相开关所并电容 $C_1 \sim C_6$ 的容量极小, 忽略其对相电流的影响. 设 SRM 运行于双管斩波的 PWM 控制模式, 即给每相的上、下两管同时施加 PWM 调制信号. 以 a 相绕组为例, 设 V_1, V_2 由同一个触发信号控制, 并设所有功率开关器件及二极管均为理想元件. 图 2 给出各开关的触发时序和准谐振波形, 其中, $S_{V_{C1}}, S_{V_{C2}}, S_{V_{C3}}$ 和 S_{pha} 分别为 V_{C1}, V_{C2}, V_{C3} 及相开关 V_1, V_2 的触发信号; i_{L_r} 为谐振电感电流; U_{C_r} 为谐振电容两端电压也即母线电压. 图 3 给出变换器处于不同阶段时的等效

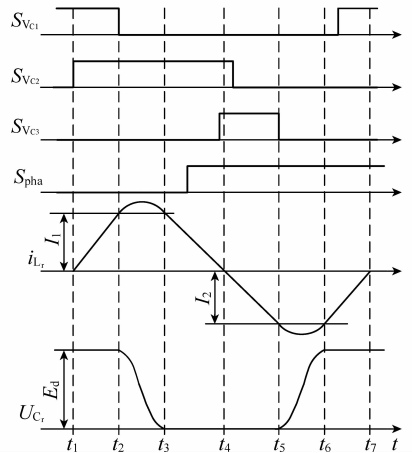


图 2 准谐振波形

Fig. 2 Operation waveforms

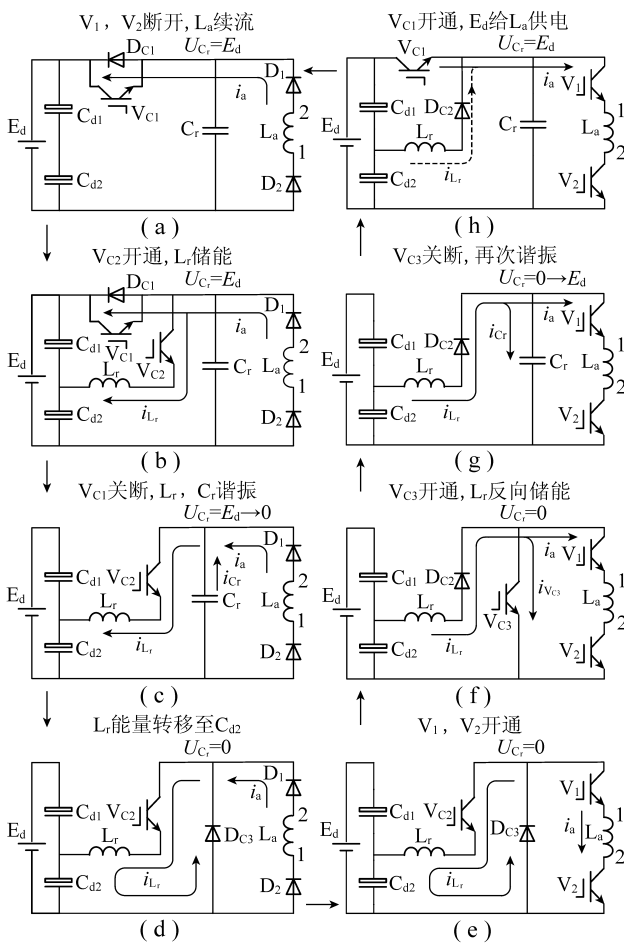


图 3 软开关原理电路

Fig. 3 Schematic of soft-switching operating

2.2 电容放电期 ($t_2 \sim t_3$)

如图 3 (c) 所示, 在 t_2 时刻关断 V_{C1} , 因电压 U_{Cr} 一直保持为 E_d , 故该关断是以零电压方式进行的. V_{C1} 关断后, 谐振元件 C_r, L_r 开始经 V_{C2} 谐振, 电容 C_r 上电荷经 L_r 释放, U_{Cr} 依谐振规律下降. 电流满足: $i_{Lr} = i_a + i_{Cr}$. 到 t_3 时刻 $U_{Cr} = 0, i_{Lr} = I_1$, 电容放电期结束, 母线电压开始进入谐振槽.

2.3 相开关开通期 ($t_3 \sim t_4$)

t_3 时刻母线电压降为零后 D_{C3} 随即导通, L_r 中积蓄的能量经 D_{C3} 形成的回路向下臂电容 C_{d2} 转移, 如图 3 (d) 所示. 因为承受恒定电压 $-E_d/2$, 电流 i_{Lr} 从 I_1 开始线性下降, 到 t_4 时刻降为零. 在 $t_3 \sim t_4$ 间可触发相开关 V_1, V_2 使之导通, 属于零电压软开通. 此间 i_a 的流电路径会发生变化: V_1, V_2 开通前, i_a 经 V_{C2}, L_r 和 C_{d2} 形成回路; V_1, V_2 开通后, i_a 经 D_{C3} 形成回路, 如图 3 (e) 所示.

2.4 电感反向储能期 ($t_4 \sim t_5$)

t_4 时刻后电感 L_r 依然承受电压 $-E_d/2$, 使得 i_{Lr} 调转方向经 D_{C2} 流通, 及时触发辅助开关器件 V_{C3} 使之导通, 保证了 i_{Lr} 以恒定速率增加, 给电感 L_r 储能. 当储能过程一开始 $i_{Lr} < i_a$ 时, i_a 中一部分流经 D_{C3} (记作 $i_{D_{C3}}$), 电流关系为 $i_a = i_{Lr} + i_{D_{C3}}$, 随着 i_{Lr} 的增加, $i_{D_{C3}}$ 逐渐减小, 至 $i_{Lr} = i_a$ 时 D_{C3} 关断, 当 $i_{Lr} > i_a$ 后, i_{Lr} 一部分流经 V_{C3} (记作 $i_{V_{C3}}$), 电流关系变为 $i_{Lr} = i_a + i_{V_{C3}}$, 如图 3 (f) 所示. t_5 时刻 i_{Lr} 达预设值 I_2 , 关断 V_{C3} . 因母线电压 U_{Cr} 为零且不能突变, 故 V_{C3} 的开通和关断均属零电压软开关动作. 当 i_{Lr} 调转方向流经 D_{C2} 后即可关断 V_{C2} , 显然属零电压兼零电流软关断.

电路. 因相开关在任何时刻关断均为零电压软关断, 下面分 5 个阶段分析如何实现相开关的软开通及各辅助开关器件的软开关工作原理.

2.1 电感正向储能期 ($t_1 \sim t_2$)

设 t_1 时刻以前相开关 V_1, V_2 已关断, 相绕组 L_a 续流, 续流路径: 电源 E_d 负极 $\rightarrow D_2 \rightarrow L_a$ 1 端 $\rightarrow L_a$ 2 端 $\rightarrow D_1 \rightarrow D_{C1} \rightarrow E_d$ 正极, 此时 $U_{Cr} = E_d$, 如图 3 (a) 所示. 在 t_1 时刻触发 V_{C2} 导通, 因电感电流不能突变, $E_d/2$ 电压全部加于电感 L_r 上, 所以器件 V_{C2} 为零电流兼零电压软开通. 从 t_1 时刻起续流路径分为两路: 一路经 D_{C1} 到 E_d 正极, 另一路经 V_{C2}, L_r 到下臂大电容 C_{d2} , 如图 3 (b) 所示. 因 L_r 承受恒定电压 $E_d/2$, 故电流 i_{Lr} 从零开始线性增加给 L_r 储能, 直到 t_2 时刻达预设值 I_1 , 电感 L_r 中积蓄了足够能量. 因 i_{Lr} 增大的同时相绕组电流 i_a 却在逐渐减小, 故 L_r 储能过程有两种情况: ① $I_1 \leq i_a$, 即在 i_{Lr} 未升至 i_a 时就已达预设值 I_1 , 这种情况在电感储能期, D_{C1} 中一直有续流电流流过; ② $I_1 > i_a$, 这种情况下 D_{C1} 中电流减为零后电源电流经 V_{C1} 与 i_a 一起构成 i_{Lr} , 保证 L_r 储能所需的能量.

2.5 电容充电期 ($t_5 \sim t_6$)

如图3(g)所示, t_5 时刻 V_{C3} 关断后, i_{Lr} 的一部分给 C_r 充电, C_r, L_r 再次谐振, U_{C_r} 逐渐上升, 直至 t_6 时刻 $i_{Lr} = I_2$, $U_{C_r} = E_d$, C_r 充电完成, 谐振结束.

2.6 相绕组供电期 ($t_6 \sim t_7$)

t_6 时刻后即可触发 V_{C1} 使之导通, 因母线电压已恢复至 E_d , 故 V_{C1} 为零电压软开通. 然后电源 E_d 开始通过 V_{C1} 向相绕组提供电流, 同时电感电流也流向相绕组, 如图3(h)所示. i_{Lr} 逐渐减小直至 t_7 时刻衰减为零, t_7 时刻后相绕组电流全部由电源 E_d 供给, 直至下次相开关 V_1, V_2 关断.

3 仿真结果及分析

用 Pspice 软件对新型 SRD 软开关功率变换器主电路进行仿真, 为了简化系统模型, SRM 相绕组等效为电感 L_a 和电阻 R_a 相串联, 仿真过程中给他们赋予一系列不同的值进行验证. 当取 $E_d = 536$ V, $C_{d1} = C_{d2} = 2$ 200 μ F, $C_1 \sim C_6 = 10$ nF, $L_r = 2.2$ mH, $C_r = 680$ nF, $L_a = 15$ mH, $R_a = 1$ Ω 时, 仿真波形如图4, 5所示.

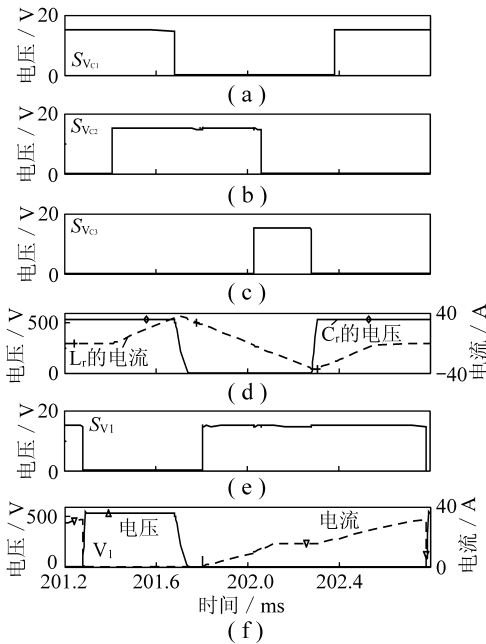


图4 谐振及相开关动作仿真波形

Fig. 4 Waveforms of resonant and phase switches operating

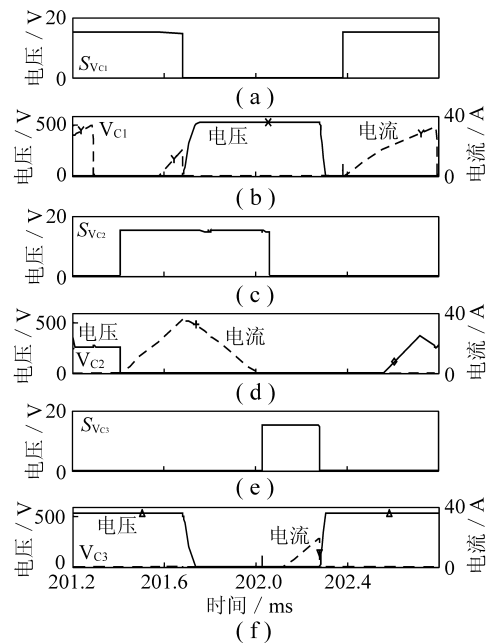


图5 辅助开关动作仿真波形

Fig. 5 Operating waveforms of auxiliary switches

图4(a), (b), (c) 分别为辅助开关 V_{C1}, V_{C2}, V_{C3} 的触发信号; 图4(d) 中虚线为谐振电感电流, 实线为母线电压波形. 当图4(b) 中 V_{C2} 的触发信号变为高电平时, 图4(d) 中电感电流从零开始线性增加, 电感储能. 当图4(a) 中 V_{C1} 触发信号低电平到来使 V_{C1} 关断后, L_r, C_r 开始谐振, 进入电容放电期, 图4(d) 中母线电压随之降为零而进入谐振槽. 此后电感电流线性下降, 到零值附近时图4(c) 中 V_{C3} 的触发信号到来, 导通 V_{C3} 将电容 C_r 短路, 保证 L_r 在恒定电压下储能, 电流变向后线性增长, 当图4(c) 信号变为低电平后, L_r, C_r 又开始谐振并给电容充电, 直到母线电压恢复至 E_d .

图4(e) 为 V_1 的触发信号; 图4(f) 中虚线和实线分别是 V_1 的电流和 V_1 两端的电压波形. 当触发信号变低时, V_1 的电流先降为零后电压才开始上升, 电压和电流无重叠区; 而开通过程中, V_1 端电压先降为零后, 电流才开始增加. 仿真过程中曾将相开关触发信号刻意安排在谐振槽的各个阶段, 结果发现, 只有如图4(e) 所示将开通时间安排在谐振槽形成初期, 才能获得理想谐振波形和软开关效果.

图 5 给出辅助开关器件的触发信号和操作过程中的电压 (实线) 和电流 (虚线) 仿真波形. 由图 5 (a), (b) 看出, V_{c1} 的关断和开通均在零电压条件下进行; 由图 5 (c), (d) 可见, V_{c2} 的开通过程是在电压完全降为零后电流才由零逐渐增加, 而关断操作显然也是在零电流兼零电压条件下完成的; 由图 5 (e), (f) 看出, V_{c3} 的触发信号到来时, 流经 V_{c3} 的电流及其两端电压均为零, 一段时间后电流才缓慢上升, 此开通动作属零电压兼零电流方式, 而关断时电流先降为零电压才逐渐升至 E_a , 属零电压方式.

4 结 语

结合准谐振直流环节电路和改进的不对称半桥式 SRD 功率电路, 提出一种新型 SRD 软开关功率变换器主电路, 就该电路的结构、特点和工作原理进行了分析, 并用 Pspice 软件进行了仿真. 仿真结果验证了电路方案中各功率开关的软开关特性. 本文提出的功率变换器主电路可有效降低谐振电感的能量损耗, 并且相开关能在任意时刻软关断, 只需控制准谐振环节给相开关的零电压开通提供谐振槽即可, 简化控制的同时也提高了母线电压的利用率. 本研究的准谐振时序及 SRM 斩波和换相逻辑由一片 DSP 控制, 芯片采用 TI 公司的 TMS320LF2407A. 整个实验系统尚在优化调试过程中, 有关实验结果期望以后撰文发表.

参考文献:

- [1] 王振民. 开关磁阻电动机的研究 [J]. 煤炭学报, 1992, 17 (2): 74 - 79.
Wang Zhenmin. Study of switch-type magnetic resistance motor [J]. Journal of China Coal Society, 1992, 17 (2): 74 - 79.
- [2] 纪良文, 蒋静坪. 开关磁阻电机神经网络磁特性分析 [J]. 煤炭学报, 2001, 26 (5): 529 - 534.
Ji Liangwen, Jiang Jingping. The analysis for magnetic characteristics of switched reluctance motor using neural network [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26 (5): 529 - 534.
- [3] 张海军, 高瑞贞, 张京军, 等. 基于有限元模型的开关磁阻电机系统控制仿真 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (7): 831 - 836.
Zhang Haijun, Gao Ruizhen, Zhang Jingjun, et al. Control simulation for switched reluctance motor system based on finite element model [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (7): 831 - 836.
- [4] 罗建武, 詹琼华, 邓 琼. 一种新型开关磁阻电机软开关功率变换器的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (17): 142 - 149.
Luo Jianwu, Zhan Qionghua, Deng Qiong. Study of a novel soft-switching converter for switched reluctance motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (17): 142 - 149.
- [5] 许春雨, 陈国呈, 张瑞斌, 等. 三相软开关逆变器的 PWM 实现方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (8): 23 - 27.
Xu Chunyu, Chen Guocheng, Zhang Ruibin, et al. A PWM realization method for three-phase soft-switching inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (8): 23 - 27.
- [6] 陈国呈. PWM 变频调速及软开关电力变换技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 175 - 200.
Chen Guocheng. PWM inverter and soft-switching power conversion technique [M]. Beijing: China Machine Press, 2001: 175 - 200.
- [7] 顾亦磊, 陈世杰, 吕征宇, 等. 单开关 DC/DC 变换器的一种软开关实现策略 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (11): 130 - 133.
Gu Yilei, Chen Shijie, Lü Zhengyu, et al. Strategy for single switch DC/DC converters to achieve soft switching [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (11): 130 - 133.
- [8] 贺昱曜, 王伟根, 徐德民. 串并联谐振 DC - AC 变换器原理分析、建模及仿真 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (12): 14 - 17.
He Yuyao, Wang Weigen, Xu Demin. Principle, analysis, modeling and simulation of a three-phase DC - AC series-parallel resonant converter [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19 (12): 14 - 17.
- [9] De Doncker, R W A, Lyons, et al. The auxiliary resonant commutated pole converter [A]. Seattle, Industry Applications Society Annual Meeting [C], 1990: 1 228 - 1 235.

- [10] De Doncker, R W A, Lyons, et al. The auxiliary quasi resonant DC link inverter [A]. Boston, PESC'91 Conference Record [C]. 1991: 248 - 253.
- [11] Divan D M, Skibinski G. Zero switching loss converter for high power applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1989, 25 (4): 634 - 643.
- [12] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 9 - 12.
Wang Honghua. The control technical of switched reluctance motor drives [M]. Beijing: China Machine Press, 1995: 9 - 12.
- [13] 陈国呈, 孙承波, 张凌岚. 一种新颖的零电压开关谐振直流环节逆变器的电路分析 [J]. 电工技术学报, 2001, 16 (4): 50 - 55.
Chen Guocheng, Sun Chengbo, Zhang Linglan. The analysis of a novel ZVS resonant DC-Link inverter topology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16 (4): 50 - 55.
- [14] Rolim L G B, Suemitsu W I, Watanabe E H, et al. Development of an improved switched reluctance motor drive using a soft-switching converter [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1999, 146 (5): 488 - 494.
- [15] Lopez G G, Kjaer P C, Miller T J E, et al. Simulation study of resonant DC link inverter for current-controlled switched reluctance motors [A]. 1997 International Conference on Power Electronics and Drive Systems Proceedings [C]. Singapore: Power Electronics and Drive Systems, 1997: 757 - 761.

973 项目“煤炭深部开采中的动力灾害机理与防治基础研究”获得立项

2009 - 10 - 19, “973 计划和重大科学研究计划 2009 年项目实施会”在北京召开, “煤炭深部开采中的动力灾害机理与防治基础研究 (2010CB226800)”获得立项。

973 项目“煤炭深部开采中的动力灾害机理与防治基础研究”以中国矿业大学(北京)姜耀东教授为首席科学家, 依托中国矿业大学(北京)、中国矿业大学(徐州)、煤炭科学研究总院、四川大学、辽宁工程技术大学、北京科技大学、安徽理工大学和山东科技大学等本领域的优势研究单位, 研究队伍由 32 名学术骨干组成。

本项目将通过煤炭深部开采中的动力灾害机理与防治基础研究, 重点探索冲击突出煤岩体的矿物成分、地质构造条件、原岩地应力环境及相互作用机制, 提出可识别深部煤岩断层构造与应力场特征的精细探测理论与关键技术; 分析地质形成过程中裂隙煤岩体在采动应力作用下的力学特性、变形破坏特征和工程动力响应规律, 建立煤岩灾变的动力学理论与判别准则; 研究深部开采引起的煤岩层运动破坏特征和采动应力场的时空演化规律、矿压显现特征, 建立深部煤矿开采的围岩稳定性理论与控制方法; 进而揭示深部裂隙煤岩体在开采过程中的能量积聚与释放机制、能量场的时空演化规律以及动力灾变的能量触发条件, 提出基于能量突变的深部煤岩体动力失稳的模型与判别准则和能量分析体系; 揭示微震、声发射和电磁辐射等前兆信息多参量与应力、煤岩结构的物理力学参数、能量耗散以及震动波强度之间的关系, 形成煤岩动力灾害的多参量监测理论与预警技术; 针对煤矿在设计、生产阶段深部动力灾害防治的特点, 开展冲击地压等动力灾害防范性、解危性措施的研究, 建立适合我国煤矿深部动力灾害综合防治的理论与技术体系。