

三 院

○三二系



序号	姓 名	职 称	单位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
1	陈道炼 李磊 胡育文	正高 博士 正高	032 032 032	双极性移相控制电压源高频交流环节AC/AC变换器研究	中国电机工程学报	2002.22.09	H
2	陈道炼	正高	032	推挽双向电流源高频环节航空静止变流器研究	电工技术学报	2002.17.04	H
3	陈道炼	正高	032	优良综合性能的高频软开关逆变电源	电力电子技术	2002.36.05	J
4	陈道炼 熊雅红	正高 硕士	032 032	有源箝位正激式高频脉冲直流环节逆变器大信号瞬态特性	电工技术学报	2002.17.01	H
5	陈宏 胡育文	博士 正高	032 032	基于重复控制的CVCf电源波形控制技术	东南大学学报	2002.32.06	H
6	陈宏 胡育文	博士 正高	032 032	针对逆变电源的重复控制器设计	电力电子技术	2002.36.05	J
7	陈宏 胡育文	博士 正高	032 032	逆变电源并联技术	电工技术学报	2002.17.17	H
8	陈宏 胡育文	博士 正高	032 032	采用重复控制器的逆变电源数字控制方案	南京航空航天大学学报	2002.34.06	J
9	陈乾宏 阮新波 严仰光	中级 正高 正高	032 032 032	采用磁集成技术的高效率、低压输出正反激变换器	电工技术学报	2002.17.01	H
10	陈新 龚春英 郇鸣 严仰光	博士 副高 硕士 正高	032 032 032 032	应用于三相变换器的三维空间矢量调制	南京航空航天大学学报	2002.34.02	J
11	陈志辉 姜长生 严仰光	中级 正高 正高	032 031 032	数字电压调节器三相电压数字测量方法的研究	电工技术学报	2002.17.02	H
12	陈志辉 姜长生 严仰光	中级 正高 正高	032 031 032	改善电压调节器调压精度的措施及其分析	南京航空航天大学学报	2002.34.02	J
13	邓智泉 何礼高 严仰光	副高 副高 正高	032 032 032	无轴承交流电机的原理与应用	机械科学与技术	2002.21.05	H
14	邓智泉 张宏全 王晓琳 严仰光	副高 博士 博士 正高	032 032 032 032	基于气隙磁场定向的无轴承异步电机非线性解耦控制	电工技术学报	2002.17.06	H
15	邓智泉 张宏苓 王晓林 严仰光	副高 博士 博士 正高	032 032 032 032	Nonlinear Decoupling Control of the Bearingless Induction Motors Based on the Airgap Motor Flux Orientation	Chinese Journal of Aeronautics	2002.15.01	EI、H
16	董尔令	副高	032	谈电工电子技术课程设计	电气电子教学学报	2002.24.02	

序号	姓 名	职 称	单 位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
17	傅大年 杨善水 严仰光	硕士 中级 正高	032 032 032	飞机自动配电管理系统电气负载管理技术的研究	南京航空航天大学学报	2002.34.01	J
18	龚春英 李伟 胡晓君 严仰光	副高 中级 硕士 正高	032 外 032 032	单级式半桥电流源高频链逆变拓扑研究分析	电工技术学报	2002.17.02	H
19	龚春英 蒋渭忠 肖岚	副高 硕士 副高	032 032 032	基于DSP控制的逆变器并联技术研究	数据采集与处理	2002.17.01	H
20	龚春英 陈敏 李伟 严仰光	副高 硕士 中级 正高	032 032 外 032	New Type Single-Stage DC/AC Inverter	Transaction of Nanjing University Aeronautics and Astronautics	2002.19.01	J
21	龚余才	副高	032	实践锻炼人，实践培养人	高校实验室工作研究	2002.00.01	
22	龚余才	副高	032	提高实验教学效果之实践	实验技术与管理	2002.19.02	J
23	顾毅康 胡育文	硕士 正高	032 032	电磁式无刷交流同步发电机的MATLAB/PSB建模	航空学报	2002.23.06	H
24	何礼高 邓智泉	副高 副高	032 032	复杂系统中通用变频调速器提高动态响应的一种方法	电工技术杂志	2002.00.01	J
25	胡江毅 李伟 龚春英	硕士 中级 副高	032 外 032	单端反激式变换器在两种工作模式下特性的比较	华东地区第二届电源技术研讨会	2002.01	
26	胡文斌 肖岚 龚春英 严仰光	博士 副高 副高 正高	032 032 032 032	3KVA高频软开关航空静止变流器并联模块研究	南京航空航天大学学报	2002.34.06	J
27	胡育文 田淳 顾毅康 游志青	正高 博士 硕士 硕士	032 032 032 032	无速度传感器永磁同步电机直接转矩控制系统	中国航空学会控制与应用第十届学术年会暨自控分会成立20周年大会	2002.01	
28	胡育文	正高	032	In-depthREsearch on Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor	IECON2002	2002.01	
29	黄文新 胡育文	博士 正高	032 032	笼型异步发电机的直接转矩控制策略的研究	电工技术学报	2002.17.17	
30	黄文新 胡育文 李磊	博士 正高 博士	032 032 032	一种新颖的空间电压矢量调制逆变器的死区补偿方法	南京航空航天大学学报	2002.00.00	J
31	黄文新 胡育文	博士 正高	032 032	笼型异步发电机的MATLAB仿真模型	中小型电机	2002.00.01	J

序号	姓 名	职 称	单 位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
32	黄文新 胡育文	博士 正高	032 032	用于航空高压直流电源系统的笼型异步发电机控制策略的研究	航空学报	2002.23.04	H
33	李斌 阮新波 李金钟	硕士 正高 硕士	032 032 032	倍流整流方式ZVS PWM三电平直流变换器	中国电机工程学报	2002.22.09	H
34	李冰 邓智泉 严仰光	博士 副高 正高	032 032 032	高速异步电机设计的关键技术	微特电机	2002.30.06	J
35	李冬 阮新波 严仰光	博士 正高 正高	032 032 032	A Hybrid Single-Switch PFC Pre-regulator	IEEE Power Electronics Specialists Conference	2002.01	
36	李磊 胡育文	博士 正高	032 032	新型自适应速度观测器在异步电机直接转矩控制系统中的应用	机械制造与自动化	2002.00.04	
37	李磊 陈道炼 李明珠 胡育文	博士 正高 硕士 正高	032 032 032 032	高频交流环节AC/AC同频变换系统基准正弦电路研究	电力电子技术	2002.36.01	J
38	李磊 陈道炼 张友军 潘海朗 胡育文	博士 正高 硕士 硕士 正高	032 032 032 032 032	双极性移相控制高频脉冲交流环节逆变器研究	电工技术学报	2002.17.06	H
39	林胜洋 陈道炼	硕士 正高	032 032	电力电子变换器机内辅助开关电源设计与实现	电力电子技术	2002.36.06	J
40	刘闯 刘迪吉 朱学忠	中级 正高 副高	032 032 032	SRG Position Sensorless Technique with Current Chopping Mode	Transaction of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics	2002.19.01	J
41	刘闯 刘迪吉 朱学忠 曹志亮	中级 正高 副高 副高	032 032 032 032	一种无位置传感器的开关磁阻发电机控制系统的研究	中国电机工程学报	2002.22.06	EI、H
42	刘闯 周波 严仰光	中级 正高 正高	032 032 032	Implementation and Study of Novel Double Salient Structure stater/generator system	Chines Journal of Aeronautics	2002.15.03	H
43	刘闯 严仰光 王川云	中级 正高 硕士	032 032 032	双凸极启动/发电系统的控制策略的研究	数据采集与处理	2002.17.04	H
44	刘军 詹晓东 严仰光	博士 副高 正高	032 032 032	适合低压大电流应用的DC/AC变换器研究	电力电子技术	2002.36.03	J
45	刘军 严仰光	博士 正高	032 032	加权电压控制多路输出正激变换器的研究	南京航空航天大学学报	2002.34.06	J
46	陆玉军 邓智泉 朱焯秋	硕士 副高 正高	032 032 032	基于CRPWM的无轴承异步电动机矢量控制系统	南京航空航天大学学报	2002.00.00	J

序号	姓 名	职 称	单位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
47	马运东 阮新波 严仰光	博士 正高 正高	032 032 032	Zero-Voltage and Zero-Current-Switching PWM Push-Pull Three-Level Converter	IEEE Power Electronics Specialists Conference	2002.01	
48	潘海朗 陈道炼	硕士 正高	032 032	场控功率器件变频升年时秒度隔 离式驱动电路应用	电工电能新技术	2002.21.04	J
49	阮新波 许大宇 周林泉 李斌 陈乾宏	正高 硕士 博士 硕士 中级	032 032 032 032 032	Zero-Voltage-Switching PWM Three-Level Converter with Two Clamping Diodes	IEEE Transactions on Industrial Electronics	2002.49.04	SCI、 EI、W
50	阮新波 许大宇 周林泉	正高 硕士 博士	032 032 032	A Simplified Zero-Voltage-Switching PWM Three-Level Converter with Two Clamping Diodes	IEEE Applied Power Electronics Conference and Exhibition	2002.01	ISTP
51	阮新波 李斌	正高 硕士	032 032	Zero-Voltage and Zero-Current-Switching PWM Hybrid Full-Bridge Three-Level Converter	IEEE Power Electronics Specialists Conference	2002.01	ISTP
52	阮新波 李斌 李金钟	正高 硕士 硕士	032 032 032	Zero-Voltage-Switching PWM Three-Level Converter with Current-Doubler-Rectifier	IEEE Applied Power Electronics Conference and Exhibition	2002.01	ISTP
53	阮新波 李斌 陈乾宏	正高 硕士 中级	032 032 032	Three-Level Converters - A New in High Voltage DC - to - DC Conversion	IEEE Power Electronics Specialists Conference	2002.01	
54	阮新波 王建冈 陈乾宏	正高 博士 中级	032 032 032	一种改进的倍流整流方式ZVS PWM全桥变换器	电工技术学报	2002.17.02	H
55	沈忠亭 严仰光	博士 正高	032 032	大功率晶体管最优驱动电路研究	南京航空航天大学学报	2002.00.00	J
56	沈忠亭 严仰光	博士 正高	032 032	Optimal PWM Based on Real-Time Solution with Neural Network	Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics	2002.19.01	J
57	石健将 王慧贞 严仰光	博士 副高 正高	032 032 032	双管正激并、串联组合变换器研 究与应用	电力电子技术	2002.36.05	J
58	石健将 龚春英 严仰光	博士 副高 正高	032 032 032	6KVA单相航空静止变流器研究	电力电子技术	2002.36.06	J
59	石健将 王慧贞 严仰光	博士 副高 正高	032 032 032	一种新颖组合变换器拓扑研究与 应用	南京航空航天大学学报	2002.34.06	J

序号	姓 名	职 称	单位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
60	石健将 王慧贞 严仰光	博士 副高 正高	032 032 032	DC/DC模块电源并联研究	电力电子技术	2002.36.03	J
61	汤立新 胡育文	博士 正高	032 032	A Novel Direct Torque Control Scheme for Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Drive System with Low Ripple in Torque and Flux, and Fixed Swithing Frequency	PESC2002	2002.01	
62	汤立新 胡育文	博士 正高	032 032	An Investigation of A Modified Direct Torque Control Strategy for Flux and Torque Ripple Reduction for Induction Machine Drive System with Fixed Switching Frequency	IAS2002	2002.01	
63	汤立新 胡育文	博士 正高	032 032	A Novel Direct Torque Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Maching Drive System with Low Ripple in Torque and Flux-A Speed Sensorless Approach	IAS2002	2002.01	
64	田淳 胡育文	博士 正高	032 032	永磁同步电机直接转矩系统理论及控制方案的研究	电工技术学报	2002.17.01	H
65	王慧贞 李启明 严仰光	副高 博士 正高	032 011 032	组合式三相逆变器负载特性的分析与研究	南京航空航天大学学报	2002.34.01	J
66	王莉 周波	副高 正高	032 032	基于模糊神经网络的位置控制器研究	数据采集与处理	2002.17.01	H
67	王勤 肖岚 严仰光	中级 副高 正高	032 032 032	高频软开关逆变器的控制分析	东南大学学报	2002.32.01	H
68	王勤 董尔令	中级 副高	032 032	交互式电工电子技术课件研制	电气电子教学学报	2002.24.05	
69	魏少华 王慧贞	硕士 副高	032 032	三态调制与两态调制逆变器稳定性浅析及比较	华东地区第二届电源技术研讨会	2002.01	
70	吴文江 穆新华 刘闯 杨志勇	硕士 副高 中级 硕士	032 032 032 032	采用电流控制策略的新型电火花加工的电源研究	电力电子技术	2002.36.02	J

序号	姓 名	职 称	单位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
71	肖岚 严仰光	副高 正高	032 032	Rugged Resonant Pole and Its Applications in Soft-switching converter	东南大学学报	2002.18.03	H
72	肖岚 胡文斌 蒋渭忠 严仰光	副高 博士 硕士 正高	032 032 032 032	基于主从控制的逆变器并联研究	东南大学学报	2002.32.01	H
73	谢少军 樊英 周大可	副高 其他1 硕士	032 外 032	Research on a novel inverter based on DC/DC converter topology	Journal of Southeast University	2002.18.04	H
74	谢少军 韩军 张勇 陈勇	副高 硕士 硕士 硕士	032 032 032 032	A novel scheme for high power high efficiency inverters	Tansaction of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics	2002.19.02	J
75	熊宇	硕士	032	四桥臂三相逆变器空间矢量调制分析	电源世界	2002.00.06	
76	徐慧 肖岚 严仰光	硕士 副高 正高	032 032 032	SVPWM逆变器数字电压调节技术的研究	南京航空航天大学学报	2002.34.05	J
77	许泽刚 谢少军	硕士 副高	032 032	混合式高频交流配电系统的实验研究	南京航空航天大学学报	2002.34.02	J
78	许泽刚 谢少军	硕士 副高	032 032	混合式高频交流配电系统的仿真研究	南京航空航天大学学报	2002.34.06	J
79	杨正龙 王慧贞	硕士 副高	032 032	一种新颖推挽正激变换器	电力电子技术	2002.36.01	J
80	叶霜 邓智泉 严仰光	硕士 副高 正高	032 032 032	New Formulae Based on Fourier Extension for Bearingless Switched Reluctance Motors	Proceedings of the eighth international symposium on magnetic bearing	2002.01	
81	易旭东 石健将 龚春英	硕士 博士 副高	032 032 032	5KVA航空静止变流器的研制	电工技术杂志	2002.00.00	J
82	易旭东 龚春英	硕士 副高	032 032	一种新颖组合式单相逆变器的研制	电源世界	2002.00.05	
83	游志青 胡育文	硕士 正高	032 032	采用重复控制技术的逆变器仿真研究	机械制造与自动化	2002.00.03	
84	张方华 王慧贞 严仰光	博士 副高 正高	032 032 032	新颖正激推挽电路的研究及工程实现	南京航空航天大学学报	2002.34.05	J
85	张勇 谢少军	硕士 副高	032 032	大功率三相静止变流器研究	南京航空航天大学学报	2002.34.01	J
86	张友军 陈道炼	硕士 正高	032 032	新颖的可控谐振阻尼LC输出滤波器	电力电子技术	2002.36.03	J

序号	姓 名	职 称	单 位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
87	周波 窦森 严仰光	正高 硕士 正高	032 032 032	三相全波升压式变换电路的换流原理及特性分析	电工技术学报	2002.17.01	H
88	周波 严仰光 顾锦筛 窦森	正高 正高 硕士 硕士	032 032 032 032	两象限斩波器调压无刷直流启动发电机研究	中国电机工程学报	2002.22.04	EI、H
89	周波 耿云亮 傅颖 严仰光	正高 硕士 硕士 正高	032 032 032 032	c-dump变换器开关控制方法的分析与比较	中国电机工程学报	2002.22.08	EI、H
90	周玲 龚春英	硕士 副高	032 032	一种新型有源功率因数校正器的研制	电力自动化设备	2002.22.09	J
91	朱焜秋 徐龙祥	其他1 正高	032 051	径向四自由度主动磁悬浮轴承控制器研究与探讨	应用科学学报	2002.20.01	H*
92	瞿成明 王慧贞	硕士 副高	032 032	有源箝位ZVS-PWM控制串联谐振变换器	电工技术杂志	2002.00.12	J

三相全波升压式变换电路的换流原理及特性分析

A Study on Principle and Characteristics of the Commutation for Three-phase Full-wave Boost Converters

周波 窦森 严仰光 (南京航空航天大学航空电源部级重点实验室 210016)

Zhou Bo Dou Sen Yan Yangguang (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics 210016 China)

摘要 三相全波升压式电路是改进型 C-dump 变换器的核心电路, 其换流过程产生的输出电压脉动, 是基于该变换器的无刷直流发电系统产生低频纹波的主要原因。分析了三相全波升压式变换电路的换流原理, 给出了换流过程的等效电路和数学模型, 讨论了换流过程对输出电压脉动影响的机理, 并提出了减小电压脉动的措施, 最后给出了数字仿真与实验结果。所介绍的功率变换器换流原理、换流特性的分析方法及有关结论对其他类型无刷直流发电机和变换器换流特性的分析也有重要参考价值。

关键词: 无刷电机 功率变换器 电压脉动 起动发电机 C-dump 变换器

中图分类号: TM462

Abstract The voltage fluctuation is an important index for a DC power system. In the brushless DC power system based on a new C-dump bi-directional converter, the voltage fluctuation is result from the commutation of the converter. The commutation characteristics and their influences on the voltage fluctuation are investigated in this paper, and some measures are proposed which can be used to reduce the voltage fluctuation. Simulation and experimental results have been given to confirm the influences of the commutation on the voltage fluctuation.

Keywords: Brushless electric machine Power converter Voltage fluctuation Starter/generator C-dump converter

1 引言

无刷直流发电机与无刷直流起动发电机(以下统称为无刷直流发电系统)是同步电机与功率变换器的有机结合体, 已成为目前机载电气领域的一个研究热点。功率变换器是无刷直流发电系统的一个重要组成部分。C-dump 变换器作为一种新型功率变换器, 最初用于无刷直流电动机调速系统^[1]。由于具有所用功率管少、可靠性高等优点, 引起了人们的重视。作者所在课题组对 C-dump 变换器关

键参数选择和开关控制方法、其供电时电机绕组互感对调速系统运行特性的影响、换相转矩脉动等方面进行了较为深入的研究^[2,3]。近来又对 C-dump 变换器应用于无刷直流发电系统进行了探索性研究。

C-dump 变换器不能直接用于无刷直流发电系统, 因为发电运行时电机和功率电路之间存在循环能量, 难以有效地将能量传输给负载, 降低了电机利用率。为此, 作者提出了用于无刷直流发电机的全波升压式 C-dump 变换器和用于无刷直流起动发

航空科学基金资助项目(97F52052)。

周波 男, 1961年生, 博士, 南京航空航天大学教授, 博士生导师, 主要从事电机控制与电子功率变换技术的教学与科研工作, 近年来主持国防预研和航空科学基础基金等多项项目, 发表论文二十多篇, 出版教材一部。

电机的 C-dump 双向功率换流变换器 (以下统称为改进型 C-dump 变换器)。

相对于无刷直流电动机, 无刷直流发电系统的研究较少, 尤其功率变换器的换流原理、特性及其对发电系统的影响尚未见文献报道。此外, 发电运行的改进型 C-dump 变换器与一般 C-dump 变换器比较, 不仅电路拓扑不同, 而且在工作原理、控制方法及其对系统的影响上也有很大的不同。因此, 一般 C-dump 变换器的许多研究结论并不适合于发电系统。

目前针对改进型 C-dump 变换器的研究主要集中在变换器的 PWM 控制模式及其对发电系统性能的影响、双向变换器起动和发电工作特性等方面^[4]。但所有这些研究都是在假设理想换流情况下进行的, 忽略了换流过程对系统的影响。然而, 换流过程对系统发电运行特性, 尤其对输出电压脉动有较大影响, 它是无刷直流发电系统产生低频纹波的主要原因。由于输出电压纹波是直流发电系统的一个重要指标, 因此, 对变换器换流原理、换流特性及其对系统的影响进行研究显然非常重要。

改进型 C-dump 变换器的核心是全波升压式变换电路, 它直接影响发电系统的运行特性, 因此本文以 C-dump 双向变换器为例, 对全波升压式变换电路的换流原理、换流特性及其对系统的影响进行了较为详细的分析, 给出了仿真与实验结果, 在此基础上, 提出了减小换流产生电压脉动的措施。

2 主电路拓扑

图1为 C-dump 双向变换器主电路拓扑, 图中 S_1 、 S_2 为起动/发电转换开关。 S_1 闭合、 S_2 接电源 V_0 时, 系统起动工作; S_1 断开、 S_2 接负载 R_L 时, 系统发电工作。C-dump 双向变换器采用前后级串联结构, 前级由主开关管 VT_a 、 VT_b 、 VT_c , 二极管 VD_{a1} 、 VD_{b1} 、 VD_{c1} 、 VD_{a2} 、 VD_{b2} 、 VD_{c2} , 电机绕组电感及储能电容 C_0 构成三相全波升压式变换电路, 用于将电机三相梯形波反电势升压变换成储能电容 C_0 直流电压; 后级由 VT_r 、 VD_r 、 L_r 、 C_d 构成 buck 电路^[5], 用于将储能电容电压变换成符合要求的直流电压。

理想换流时, 全波升压式电路输出电流 (即相绕组电流) 为矩形波 (图2)。但实际上由于绕组电感的作用, 两相绕组换流并非瞬时完成, 相电流

不可能为矩形波, 存在三相绕组同时通电情况 (图3)。这种非理想换流对系统发电运行特性将产生较大的影响。为了了解这种影响的程度, 有必要分析换流原理及建立换流过程的等效电路与数学模型。

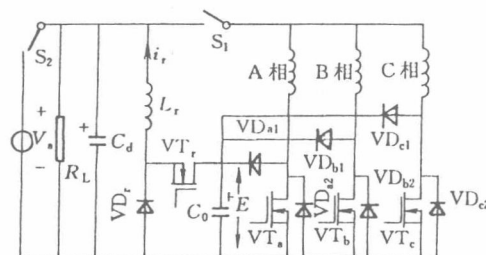


图1 C-dump 双向变换器电路拓扑

Fig.1 The topology of C-dump bi-directional converter

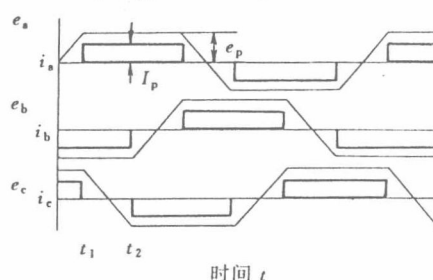


图2 理想情况下反电势与电流波形

Fig.2 The waveforms of the ideal back EMFs and currents

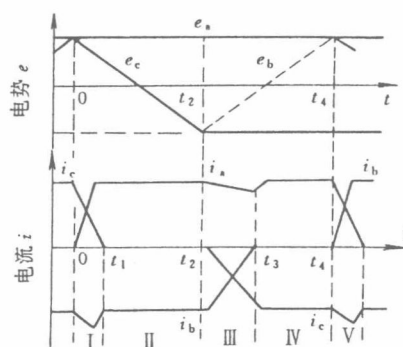


图3 非理想换流的电流波形

Fig.3 The waveforms of the non-ideal currents

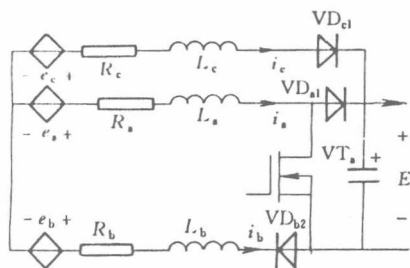
3 换流过程的理论分析

假设: ①电机相反电势为理想梯形波, 幅值为 e_p ; 反电势正平顶时输出相电流规定为正向电流, 其幅值为 I_p , 见图2。②电机三相绕组对称, 绕组电感与电阻分别为 L_s 和 R_s 。现以 C 相向 A 相正向换流和 B 相向 C 相反向换流 (图3中 $0 \sim t_1$ 和 $t_2 \sim t_3$ 时段) 为例, 分析变换电路的换流过程及其

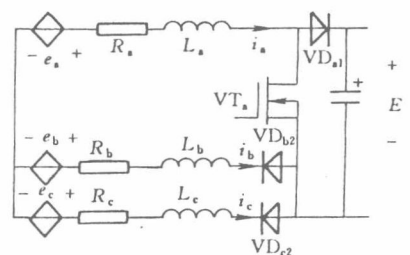
对电压脉动的影响。

3.1 正向换流过程的电流变化规律

C 相向 A 相正向换流过程等效电路如图 4a 所示。换流开始后, 被换流主开关 VT_c 关断, 该相电流 i_c 急剧下降; 为使欲换流电流 i_a 快速上升, 欲换流主开关 VT_a 以最大占空比工作, 即 VT_a 换



(a) 正向换流



(b) 反向换流

图 4 换流过程的等效电路

Fig.4 The equivalent circuit of commutation

流期间全开通。因此, 图 4a 回路电压方程为

$$L_s \frac{di_c}{dt} + R_s i_c - L_s \frac{di_b}{dt} - R_s i_b = e_c - e_b - E \quad (1)$$

$$L_s \frac{di_a}{dt} + R_s i_a - L_s \frac{di_b}{dt} - R_s i_b = e_a - e_b \quad (2)$$

此时反电势 $e_a = e_p$, $e_b = -e_p$, 且 $i_a + i_b + i_c = 0$; 由于正向换流过程较 C 相反电势变化快得多, 可近似认为 e_c 仍为峰值 e_p 。另外, 考虑到 R_s 很小, 分析时忽略不计。则由式 (1) 及式 (2) 可得

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{2(e_p - E)}{3L_s} \quad (3)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{2e_p + E}{3L_s} \quad (4)$$

若转速较高, i_a 上升率将大于 i_c 下降率, 即 i_a 在 i_c 下降到零之前到达峰值 I_p (图 5a); 否则, 若转速较低, i_a 上升率小于 i_c 下降率。 i_c 下降到零时, i_a 仍未达到峰值 I_p (图 5b), 这时

$$i_a + i_b = 0 \quad (5)$$

则由式 (2) 可知 i_a 上升率变为

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{e_p}{L_s} \quad (6)$$

显然, Δt_3 时段 i_a 上升率小于 Δt_1 、 Δt_2 时段的上率。

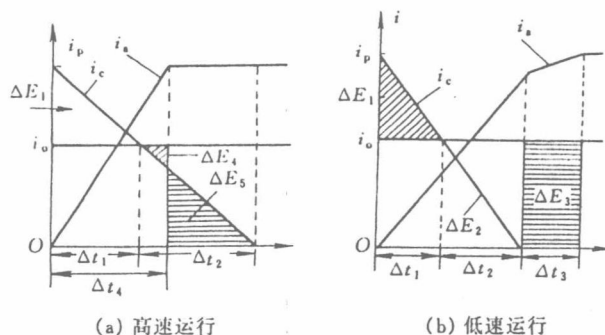


图 5 正向换流过程电流变化情况

Fig.5 The waveforms of currents in positive commutation

3.2 反向换流过程的电流变化规律

反向换流为二极管自然换流过程。图 3t₂ 时刻后, 反电势 e_c 开始小于 e_b , 二极管 VD_b 截止, VD_c 导通, i_b 从 $-I_p$ 上升到零, 而 i_c 从零下降到 $-I_p$, 对应等效电路如图 4b 所示。由图得

$$L_s \frac{di_a}{dt} + R_s i_a - L_s \frac{di_c}{dt} - R_s i_c = e_a - e_c - k_c E \quad (7)$$

$$L_s \frac{di_a}{dt} + R_s i_a - L_s \frac{di_b}{dt} - R_s i_b = e_a - e_b - k_c E \quad (8)$$

式中 k_c ——主开关开关状态, 开通时 $k_c = 0$, 关断时 $k_c = 1$

上述两式按 VT_a 通断两种情况可得两个表达式, 然后分别采用平均值法^[6]合并、整理, 并忽略 R_s , 可得

$$L_s \frac{di_a}{dt} - L_s \frac{di_c}{dt} = 2e_p - (1 - D)E \quad (9)$$

$$L_s \frac{di_a}{dt} - L_s \frac{di_b}{dt} = e_a - e_b(1 - D)E \quad (10)$$

式中 D ——主开关稳态占空比

联解式 (9)、式 (10) 得

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{-3e_p - e_b + (1 - D)E}{3L_s} \quad (11)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{2e_b + (1 - D)E}{3L_s} \quad (12)$$

换流前 VT_a 处于稳定工作状态, 其占空比为

$$D = 1 - \frac{2e_p}{E} \quad (13)$$

不妨假设换流期间 VT_a 仍以稳态占空比 D 工作, 由式 (11) ~ 式 (13) 得

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{e_p - e_b - 2(1-D)E}{3L_s} = \frac{-e_p - e_b}{3L_s} < 0 \quad (14)$$

显然 i_a 偏离 I_p (小于 I_p)。由于系统采用工作相电流作为反馈电流, 故此时电流反馈取自 i_a , 因此, 电路的负反馈作用将使前级变换器占空比 D 上升, 力图使 i_a 保持 I_p 不变。但系统的滞后只能使 i_a 下降速度降低而不能保持恒定。 D 的增大使 i_b 上升率减小, i_c 下降率增大, 尽量促使 i_b 到零时 i_c 恰好下降到 $-I_p$, 从而使 i_a 偏离 I_p 的程度较小。

4 换流过程对电压脉动的影响

4.1 低速时正向换流对输出电压脉动的影响

低速运行时, 换流过程相电流波形如图 5b 所示, 图中阴影部分表示每阶段储能电容 C_0 电压的变化量。由于换流过程 VT_a 全导通, i_a 将全部通过 VT_a , 而未流经 C_0 , 因此, C_0 电压的变化主要由被换流电流 i_c 的变化引起。按 i_c 的变化情况分三个阶段:

(1) i_c 从 I_p 下降到 I_0 的 Δt_1 时段内: i_c 除一部分作为输出电流 I_0 流向后级外, 其余均流入 C_0 , 使 C_0 充电, 其电压 E 上升, 产生的电压增量为 ΔE_1 ;

(2) i_c 从 I_0 下降到零的 Δt_2 时段内: i_c 小于 I_0 , C_0 放电, E 下降, 电压增量为 ΔE_2 ;

(3) $i_c = 0$ 到 i_a 上升到 I_p 的 Δt_3 时段内: 负载电流全部由 C_0 提供, 故 E 继续下降, 下降量为 ΔE_3 。

显然, 低速运行过程输出电压的波动经历上升、下降, 然后又下降三个阶段, 因此, 该过程电压脉动量应为

$$\Delta E = \max\{\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_3\} \quad (15)$$

4.2 高速时正向换流对输出电压脉动的影响

转速较高时, 换流波形如图 5a 所示, 其变化过程也可分为三个阶段:

(1) i_c 从 I_p 下降到 I_0 的 Δt_1 时段内: 情况同低速运行, 电压增量仍为 ΔE_1 ;

(2) 从 $i_c = I_0$ 到 i_a 上升至 I_p 的 $\Delta t_4 \sim \Delta t_1$ 时段内: $i_c < I_0$, C_0 放电, 故 E 下降, 电压增量为 ΔE_4 ;

(3) 从 $i_a = I_p$ 到 i_c 下降为零的 Δt_2 时段内: i_a 到达 I_p 后, T_a 占空比恢复为稳态值 (< 1)。这时输出的负载电流 I_0 由 i_a 提供, 而 i_c 作为 C_0 充电电流, 使 C_0 电压上升, 电压增量为 ΔE_5 。

由上述换流过程可见, 高速运行时, 输出电压先上升然后下降, 最后再上升。因此, 电压脉动量应为

$$\Delta E = \max\{\Delta E_1, \Delta E_4, \Delta E_5, |\Delta E_1 - \Delta E_4 + \Delta E_5|\} \quad (16)$$

4.3 反向换流对输出电压脉动的影响

反向换流前, VT_a 以稳态占空比 D 工作, 此时 i_a 的幅值为

$$I_a = I_p = \frac{I_0}{1-D} \quad (17)$$

换流过程中, 由于参与换流的两相电流 i_b 和 i_c 的上升与下降率不同, 使 i_a 小于 I_p 。因此, i_a 不足以提供输出电流 I_0 , 保持输出恒定, 不足部分由 C_0 提供, 故 C_0 电压必定下降, 从而产生负的电压增量 ΔE_6 。 i_a 的反馈作用、占空比 D 的瞬时上升只能减小 ΔE_6 , 而不能完全消除电压脉动。

5 仿真与实验结果

系统参数: 开关频率 $f = 20\text{kHz}$, 直流电源电压 $V_0 = 200\text{V}$, 输出负载电流 $I_0 = 5\text{A}$, 储能电容 $C_0 = 100\mu\text{F}$, 储能电容电压 $E = 300\text{V}$, 电势系数 $C_e = 0.0387\text{V/r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。利用上述参数对基于改进型 C-dump 变换器的无刷直流发电系统进行仿真分析与试验。

图 6 为正向换流过程高、低速运行时储能电容 C_0 电压各阶段的脉动量 ΔE 随反电势 (转速) 的变化曲线。可以看出, ΔE_4 和 $\Delta E_2 + \Delta E_3$ 分别为高、低速时 C_0 最大脉动电压, 因此, 可用它们表示高、低速时 C_0 脉动电压。图 7 为正向换流高、低速时最大电压脉动量与反向换流过程电压脉动量的比较。由图可见, 低速时影响电压脉动主要是正向换流, 而中速和高速时影响电压脉动主要是反向换流。随着转速的升高, 正向换流电压脉动将明显减小。但转速升高到一定程度后, 减小程度不仅不

明显, 反而略有增加。反电势的变化对反向换流影响较小, ΔE_6 几乎不随转速变化。

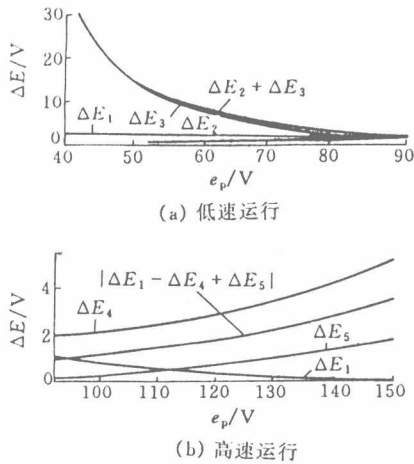


图 6 正向换流时 C_0 电压脉动量随转速变化情况

Fig.6 Variation curves for C_0 voltage fluctuation in positive commutation

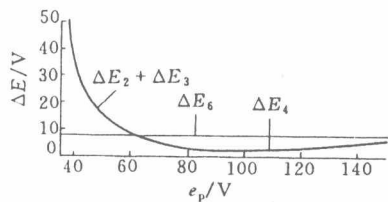


图 7 正反向换流过程 C_0 电压脉动量的比较

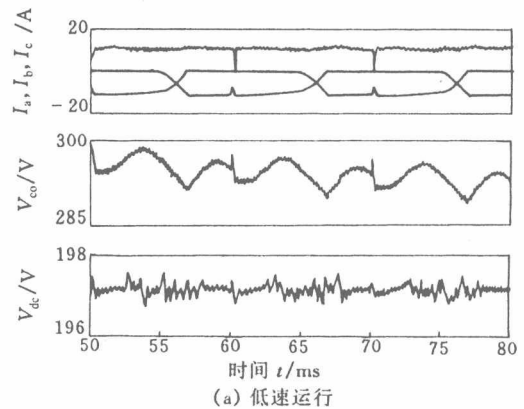
Fig.7 Variation curves for C_0 voltage

fluctuation in positive and negative commutation

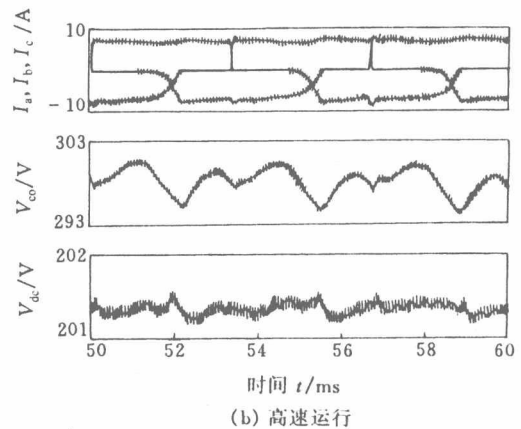
图 8 分别为高、低速运行时换流过程的仿真波形。其中, 上线为三相电流波形, 中线为储能电容脉动电压波形, 下线为输出电压纹波波形。低速时, 储能电容电压脉动和输出电压脉动分别为 7.58V 和 0.80V; 高速时, 分别为 5.46V 和 0.41V。图 9、10 分别为高、低速运行时实验波形。图 9a、图 10a 上线为三相电流波形, 下线为前级电路占空比波形; 图 9b、图 10b 上线为储能电容脉动电压波形, 下线为系统输出电压的纹波波形。低速时, 储能电容电压脉动和输出电压脉动分别为 7.22V 和 0.82V; 高速时, 分别为 3.58V 和 0.51V。可见高速运行时电压脉动小于低速运行。实验结果与仿真计算基本一致, 实验波形中输出电压脉动略大于仿真波形中电压脉动, 主要是因为实验所用电机反电势与理想梯形波有差距, 因此反电势波形也造成一定的电压脉动。

另外, 由图 9a 和 10a 下线波形可见, 前级电

路占空比在换流过程变化较大, 正向换流时为使换流电流快速上升, 占空比达到了最大值; 反向换流时, 占空比先上升然后再下降, 其作用是减小非换流电流在反向换流过程的变化, 从而有利于反向换流电压脉动的减小。



(a) 低速运行



(b) 高速运行

图 8 三相电流 (上线)、 C_0 脉动电压 (中线)

和系统输出电压纹波 (下线) 的仿真波形

Fig.8 The simulation waveforms for phase currents (up-line), C_0 voltage fluctuation (middle-line) and output voltage fluctuation (bottom-line)

6 结论

(1) 换流过程引起的输出电压脉动是无刷直流发电系统产生电压纹波的主要原因; 全波升压式变换电路的换流过程分正向换流和反向换流两种, 正向换流是由主开关切换形成的换流过程, 而反向换流则是变换电路中的整流二极管的自然换流过程。

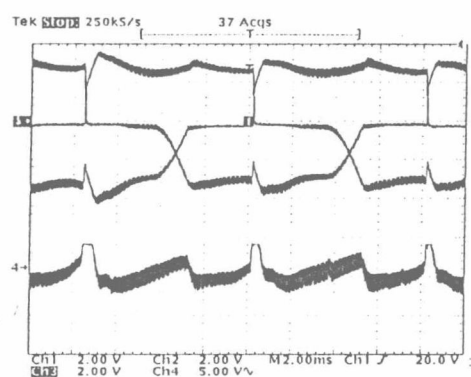
(2) 正向与反向换流过程的电流变化规律及其对电压脉动的影响是不同的, 低速运行时, 影响输出电压脉动主要是正向换流, 电压脉动随转速升高明显减小; 中、高速后, 反向换流产生的电压脉动

高于正向换流,但其大小基本不随转速变化。

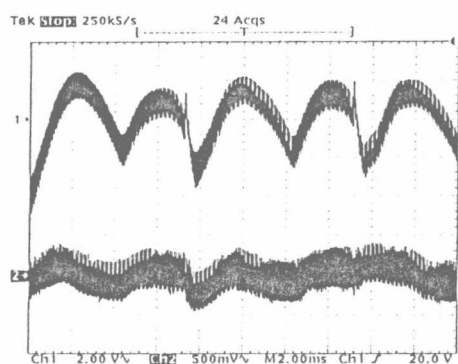
(3) 减小换流产生电压脉动的措施是:应避免电机低速运行,如果需要低速运行,也应考虑使参与换流的两相电流变化率尽量接近。高速时,应尽量

提高系统的响应速度(尤其电流环的响应速度),加快电流调节速度,以减小反向换流产生的电压脉动。

(4) 本文所介绍的研究方法及有关结论适用于其他无刷直流发电机和功率变换器。



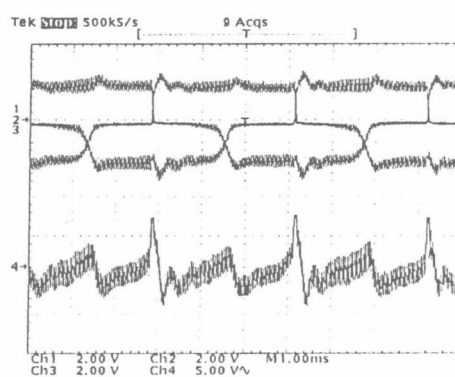
(a) 上:三相电流波形(5A/格)
下:占空比D波形(5V/格)



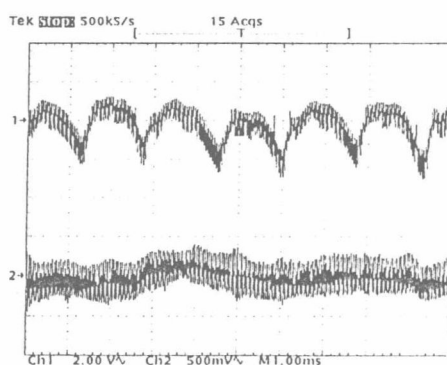
(b) 上: C_α 脉动电压波形(2V/格)
下:输出电压纹波波形(500mV/格)

图9 低速时换流过程的实验波形

Fig.9 Experimental waveforms for commutation in low-speed operation



(a) 上:三相电流波形(5A/格)
下:占空比D波形(5V/格)



(b) 上: C_α 脉动电压波形(2V/格)
下:输出电压纹波波形(500mV/格)

图10 高速时换流过程的实验波形

Fig.10 Experimental waveforms for commutation in high-speed operation

参考文献

- 1 Krishnan R, Lee Shiyoung. PM brushless DC motor drive with a new power-converter topology. IEEE Transaction on Industry Applications, 1997, 33 (4): 973~982
- 2 周波, 傅颖, 穆新华, 严仰光. 无刷直流电机电容储能型变换器的参数设计. 中国电机工程学报, 2000, 20 (4): 72~76
- 3 傅颖, 周波. 电容储能型变换器供电的PMBDC电机换相转矩脉动的分析. 南京航空航天大学学报, 2000, 32

(3): 359~363

- 4 周波, 窦森, 穆新华, 严仰光. 基于C-dump双向变换器的新型无刷直流启动/发电机工作特性的理论分析与仿真研究. 中国电机工程学报, 2000, 20 (12): 33~37
- 5 丁道宏. 电力电子技术. 北京: 航空工业出版社, 1995.
- 6 蔡宣三, 龚绍文. 高频功率电子学. 北京: 科学出版社, 1993.

收稿日期 2001-05-17

C-dump 变换器开关控制方法的分析与比较

周波, 耿云亮, 傅颖, 严仰光

(南京航空航天大学航空电源部级重点实验室, 江苏 南京 210016)

ANALYSIS AND COMPARISON ON THE CONTROL STRATEGY OF THE C-DUMP CONVERTER

ZHOU Bo, GENG Yun-liang, FU Ying, YAN Yang-guang

(Key Laboratory of Aeronautical Power System, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,
Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: The C-dump converter is a new type of power converter used in brushless DC motors, and its switching control strategies have a major effect on the armature currents ripple of the motor and the voltage fluctuation of the energy recovery capacitor in the converter. This paper is devoted to investigating the switching control strategies and their effects on the motor system. The two switching control strategies, PWM control and hysteresis control, for the main switches in the converter are discussed. In particular, several switching control strategies for the chopping switch are analyzed and compared in detail, including the hysteresis control, the PWM control with higher or lower switching frequencies than those of the main switches, the synchronous PWM control with main switches, and the synchronous PWM control combined with the hysteresis control. The synchronous PWM control combined with hysteresis control is recommended for the C-dump converter due to its small current ripple of the motor and voltage fluctuation of the energy recovery capacitor. The results of the numerical simulation and experiments have demonstrated the effectiveness of the recommended switching control strategy.

KEY WORDS: brushless electric machines; switching control; C-dump converter; current ripples; energy dumped capacitor; PWM

摘要: C-dump 变换器是一种用于无刷直流电动机的新型功率变换器, 其开关控制方式对电枢电流和变换器储能电容电压脉动有较大的影响。该文对 C-dump 变换器主开关和斩波开关的开关控制方式及其对电机电流和变换器储能电容电压脉动的影响进行了研究。首先对 C-dump 变换器主开关的 PWM 控制和滞环控制两种工作方式进行了比较,

然后重点对斩波开关的滞环控制、斩波频率高于主开关频率的 PWM 控制、斩波频率低于主开关频率的 PWM 控制、主开关与斩波开关同步 PWM 控制、主开关与斩波开关同步 PWM 并结合斩波开关滞环控制等 5 种开关控制方法进行了详细的理论分析与比较。结果表明: 主开关与斩波开关同步 PWM 并结合斩波开关滞环控制可较好地减小储能电容电压和电机电流脉动, 有利于改善系统性能。最后进行了仿真与实验验证。

关键词: 无刷电机; 开关控制; C-dump 变换器; 电流脉动; 储能电容; 脉宽调制

中图分类号: TM301.2; TP276 文献标识码: A

1 引言

C-dump 变换器又称电容储能型变换器, 是一种用于无刷直流电动机的新型功率变换器^[1, 2]。该变换器采用两级变换电路组合方式, 如图 1 所示。前级变换电路把电源能量传输给电机, 后级变换电路用于把前级主开关关断时绕组电感储能以及电机制动时回馈能量传输到电源侧。这种变换器的独特结构要求对前后级变换电路的开关管进行协调控制, 因为前后级变换电路的开关控制方式(尤其后级变换电路的斩波开关控制方式)不仅影响电机电枢电流脉动, 而且关系到系统能否正常工作, 因此, 有必要对 C-dump 变换器开关控制方式进行分析。本文首先对 C-dump 变换器前级变换电路主开关的 PWM 工作和滞环控制两种工作方式进行了比较, 然后对 C-dump 变换器后级变换电路斩波开关的 5 种开关控制方式进行了详细的理论分析与比较。这 5 种方式是: ①斩波开关的滞环控制; ②斩波频率

高于主开关频率的 PWM 控制; ③斩波频率低于主开关频率的 PWM 控制; ④主开关与斩波开关同步 PWM 控制; ⑤主开关与斩波开关同步 PWM 并结合斩波开关滞环控制。研究表明: 主开关与斩波开关同步 PWM 并结合斩波开关滞环控制可较好地减小储能电容电压和电机电流脉动, 有利于改善系统性能。本文最后进行了数字仿真与系统实验, 验证了理论分析的正确性。

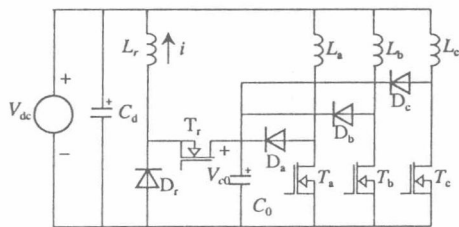


图1 C-dump 变换器主电路拓扑结构
Fig.1 The topology of the C-dump converter

2 C-dump 变换器的开关控制模式

2.1 开关过程的等效电路

C-dump 变换器供电的无刷直流电动机工作时, 单相导电, 即变换器 A、B、C 三相主开关 T_a 、 T_b 、 T_c 轮流开通 120° 。为简化分析, 变换器三相主开关统一表示为 T_s 。变换器开关工作时, 无论主开关 T_s 与斩波开关 T_r 采用何种控制方式, 主电路的工作情况可用 4 种状态表示: ① T_s 开通、 T_r 开通; ② T_s 开通、 T_r 关断; ③ T_s 关断、 T_r 关断; ④ T_s 关断、 T_r 开通, 等效电路如图 2 所示。

与图 2(a)(b)(c)(d)对应的状态方程分别为

$$\begin{cases} L_s \frac{di_s}{dt} + e_p = V_{dc} \\ L_r \frac{di_{L_r}}{dt} = V_{c_0} - V_{dc} \\ C_o \frac{dV_{c_0}}{dt} = -i_{L_r} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_s \frac{di_s}{dt} + e_p = V_{dc} \\ L_r \frac{di_{L_r}}{dt} = -V_{dc} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} L_s \frac{di_s}{dt} + e_p + V_{c_0} = V_{dc} \\ L_r \frac{di_{L_r}}{dt} = -V_{dc} \\ C_o \frac{dV_{c_0}}{dt} = i_s \end{cases} \quad (3)$$

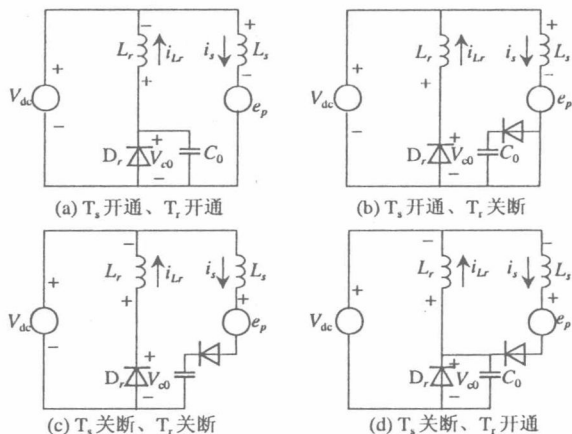


图2 C-dump 变换器开关过程的等效电路
Fig.2 The equivalent circuits of the C-dump converter in its switch operation

$$\begin{cases} L_s \frac{di_s}{dt} + e_p + V_{c_0} = V_{dc} \\ L_r \frac{di_{L_r}}{dt} = V_{c_0} - V_{dc} \\ C_o \frac{dV_{c_0}}{dt} = i_s - i_{L_r} \end{cases} \quad (4)$$

式中, L_s 为电枢绕组电感, L_r 为滤波电感, i_s 为电枢电流, i_{L_r} 为滤波电感电流, e_p 为电机反电势, C_o 为储能电容, V_{c_0} 为储能电容电压, V_{dc} 为变换器直流电源电压。

2.2 主开关控制方式

变换器主开关可采用 PWM 或滞环控制方式。滞环控制的优点是电流跟踪性能好, 响应速度快, 限流特性好, 省去了生成 PWM 信号所需的三角波电路和脉宽调制电路; 缺点是开关频率不稳定, 受许多因素影响, 尤其与电机转速关系很大。频率过高则开关损耗较大; 而频率过低则电流响应较慢, 一般需加稳频电路。

PWM 控制的优点是开关频率恒定, 不需稳频电路, 调试相对简单; 缺点是需要专门的三角波形成电路和脉宽调制电路, 另外, 存在控制延时, 最大失控时间为一个载波周期, 但由于主开关工作频率一般较高, 这种失控时间对调速系统几乎没有影响。故本文从简单性考虑, 主开关采用 PWM 控制方式。

2.3 斩波开关控制方式

2.3.1 滞环控制方式

这一方式是对储能电容电压 V_{c_0} 采用两态调制, 将 V_{c_0} 限制在固定的范围 ΔV_{c_0} 内。当 V_{c_0} 超过设定最大值时, 开通斩波开关 T_r 使 V_{c_0} 下降; 而当 V_{c_0} 低于设定的最小值时, 关断 T_r 使 V_{c_0} 上升。 T_r