

文章编号: 1001-0920(2004)10-1159-04

一种新颖的多电平矩阵变换器的建模与仿真

张华强, 王新生, 王立国, REZA Hadian, 徐殿国

(哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在传统矩阵变换器和多电平逆变器的基础上, 提出一种新颖的多电平矩阵变换器, 介绍了其拓扑结构和工作原理。多电平矩阵变换器的能量传递, 是通过三相输入电压对 midpoint 电容充电到一个恒定直流电压而实现的。选择适当的控制算法和电容电压, 能在变换器的两侧合成低次谐波含量小且波形近似于正弦的可控输入/输出电压。对多电平矩阵变换器进行建模和仿真, 并探讨了其输出能控性。

关键词: 多电平矩阵变换器; 控制算法; 能控性; 建模; 仿真

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

Modeling and simulation of a novel multilevel matrix converter

ZHANG Hua-qiang, WANG Xin-sheng, WANG Li-guo, REZA Hadian, XU Dian-guo

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China Correspondent: ZHANG Hua-qiang, Email: zhq0027@sina.com)

Abstract: On the basis of a conventional matrix converter and a multilevel inverter, a novel multilevel matrix converter is proposed, and its topology configuration and principle are introduced. This converter operates as a bidirectional converter and transfers energy between its two sides by charging the midpoint capacitors to a known constant DC voltage level. Proper selection of control algorithms and capacitor voltages helps synthesize controllable and waveforms almost sinusoidal three-phases AC voltage with minimum low-order harmonics at both sides of the converter. The multilevel matrix converter is modeled and simulated with its output controllability discussed.

Key words: multilevel matrix converter; control algorithm; controllability; modeling; simulation

1 引言

矩阵变换器(MC)是在强迫换流周波变换器的基础上发展起来的一种AC-AC直接变换器, 由于其诸多理想特性而备受关注。当用于风力发电时, 为提高MC的电压传输比和功率传输效率, 在不同风速下最大程度地获取和转换风能, 本文结合多电平逆变器和矩阵变换器的优点, 提出一种新颖的多电平矩阵变换器(MMC)。

Osama等提出了应用多级MC供电和矢量变换控制的永久励磁发电技术^[1], 增加了功率传输能力, 实现了变速风力发电控制。文献^[2]提出了应用MC供电和矢量变换控制的交流励磁发电技术。对

于变速恒频风力发电已有研究, 但对MMC的研究却较少。本文从MMC的拓扑结构入手, 分析其工作原理, 并对MMC进行建模和仿真, 探讨其输出能控性。

2 多电平矩阵变换器的拓扑结构

如图1所示, 多电平矩阵变换器的拓扑结构是由9个四象限开关组成的 3×3 开关矩阵, 每个四象限开关类似于一个全桥逆变器的开关单元, 开关单元内部器件的电压总是被箝位到一个恒定的电容电压 V_{cap} 上, 从而大大减少了开关器件的电流和电压应力。

MMC两侧各有9条支路, 每条支路用一个开

收稿日期: 2003-11-17; 修回日期: 2004-02-02

作者简介: 张华强(1967—), 男, 山东威海人, 副教授, 博士生, 从事电力矩阵变换器的研究; 徐殿国(1960—), 男, 黑龙江大庆人, 教授, 博士生导师, 从事电力电子及电力传动等研究。

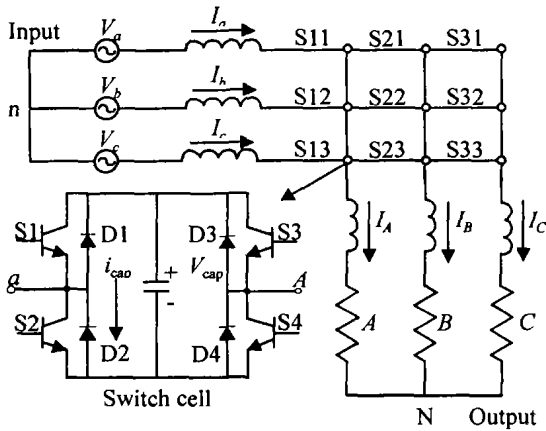


图 1 多电平矩阵变换器的拓扑结构

关单元连接,连接的限定条件为: 1) 由于两侧电感的存在, 两侧相电流必须连续, 输入/输出相不能开路; 2) MMC 所有支路在开关矩阵内部不能短路; 3) 开关单元的开路电压不能超过 V_{cap} , 以避免开关器件的高压应力 总之, 任一瞬间只允许有 5 条支路连接, 满足条件的连接支路有 81 条 每条支路由一个开关单元连接, 每个开关单元有 3 种有效工作状态, 则 5 条支路连接的组合有 $3^5 = 243$ 种, 总的开关组合为 $243 \times 81 = 19\ 683$

复杂的开关组合对 MMC 的控制和建模相当困难, 但当维持中点电容电压基本恒定时, 应用空间矢量调制技术, 设计一个可控的 MMC 是完全可行的

3 MMC 工作原理

对于 MMC 而言, 两个最基本的技术要求是输入、输出电压可控, 电压波形中谐波含量控制在允许值以内 MMC 的能量传递是通过输入电压对中点电容充电到一个恒定直流电压而实现的, 选择适当的空间矢量控制算法^[3]和电容电压值, 就能在变换器的两侧合成期望的输入/输出电压 不同的开关状态合成的电压等级不同 图 1 中开关单元的电容电压 V_{cap} 相当于一个直流电压源, 每个开关单元有 4 种不同的开关状态, 从节点 a 到节点 A 提供了不同的电压电平 具体分析如下:

- 1) 状态 1: D1, D4 或 S1, S4 “on”, 则 $V_{aA} = +V_{cap}$;
- 2) 状态 2: S2, S3 或 D2, D3 “on”, 则 $V_{aA} = -V_{cap}$;
- 3) 状态 3: D1, S3 或 S2, D4 “on”; 或 S1, D3 或 D2, S4 “on”, 则 $V_{aA} = 0$;
- 4) 状态 4: 所有开关 “off”, V_{aA} 由 MMC 内部其他连接决定, 但总有 $V_{aA} \leq V_{cap}$.

上述 4 种状态的电压电平, 在开关单元的两侧可合成三电平的相电压波形, 因而称为多电平变换器^[4]. 根据 MMC 连接的限定条件, 用空间矢量控制选择开关组合时, 应遵循下列规则:

- 1) 在任何输入输出相间有且只有一条连接;
- 2) 如果 MMC 本侧任何一相与对侧有两条连接 (2 相), 则本侧的第 2 相与对侧必须也有两条连接 (2 相), 本侧的第 3 相与对侧只有一条连接;
- 3) 如果 MMC 本侧的任何一相与对侧有 3 条连接 (3 相), 则本侧的其余两相与对侧各自只有一条连接;
- 4) MMC 两侧的任何一相在不同的连接组合中不得悬空

4 MMC 建模与仿真

4.1 MMC 建模

对于 MMC 的建模, 可用状态空间方程进行描述 由上节分析知, 开关单元中的电流通过支路作用于输入/输出相电流^[5], 按图 2 的节点连接形式, 约定输入侧电流箭头方向为 “+”; 输出侧电流箭头方向为 “-”. 根据基尔霍夫电流定律, 其输入/输出相电流和支路电流的关系为

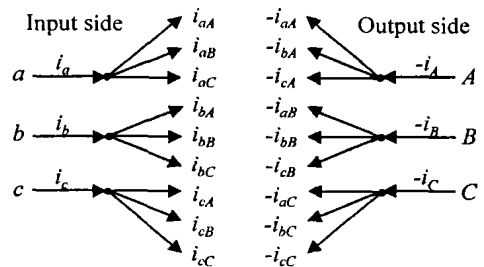


图 2 输入/输出相-支路电流关系

$$\begin{cases} i_a = i_{aA} + i_{aB} + i_{aC}, \\ i_b = i_{bA} + i_{bB} + i_{bC}, \\ i_c = i_{cA} + i_{cB} + i_{cC}, \\ i_A = i_{aA} + i_{bA} + i_{cA}, \\ i_B = i_{aB} + i_{bB} + i_{cB}, \\ i_C = i_{aC} + i_{bC} + i_{cC} \end{cases} \quad (1)$$

写成矩阵 $A X = u$ 的形式, 有

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} i_{aA} \\ i_{aB} \\ i_{aC} \\ i_{bA} \\ i_{bB} \\ i_{bC} \\ i_{cA} \\ i_{cB} \\ i_{cC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中, A 是一个 6×9 的支路连接主矩阵(标量矩阵), X 是一个 9×1 的支路电流主矩阵(矢量矩阵), U 是一个 6×1 的相电流矩阵(矢量矩阵)。

按开关组合的约束条件, 在任一瞬间只有 5 条支路连接输入/输出相, 相电流有且只有 5 个独立变量, 故上述矩阵必须合理降维。定义 A 为 5×5 的非奇异系统矩阵, B 为 5×5 的控制矩阵, U 为 5×1 的输入矢量矩阵, X 为 5×1 的状态矢量矩阵, 则系统的状态方程为

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (3)$$

因为支路电流在任何单独的开关组合中, 所形成的状态矢量是一个常数, 所以 $\dot{X} = 0$, 故

$$AX + Bu = 0 \quad (4)$$

由式(2)和(4)知

$$B = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

系统输出方程可通过开关单元中点电容电压和支路电流的关系来获得。图 1 中开关单元中点电容电压瞬时值表达式为

$$V_{cap}(t) = \frac{1}{c} \int_{0_+}^t i_{cap}(\tau) d\tau + V_{cap}(0_+) \quad (5)$$

控制策略要求电容电压维持恒定, 设 $V_{cap}(0_+) = 0$, 稳态时 $V_{cap}(t) = V_{cap}$ 。由于器件开关组合的开关频率较大, 电容电流不能突变, $i_{cap}(t)$ 相对稳定, 则有

$$V_{cap}(t) = \frac{1}{c} i_{cap}(t) T_s \quad (6)$$

其中 T_s 为器件开关组合的开关周期。用支路电流 $i_{aA}(t)$ 描述电容电流 $i_{cap}(t)$ 的形式, 有

$$i_{cap}(t) = i_{aA}(t) S_c \quad (7)$$

根据第 3 节的分析, 定义开关单元状态: 状态 1, $S_c = 1$; 状态 2, $S_c = -1$; 状态 3 或 4, $S_c = 0$ 则输出方程可描述为

$$\begin{bmatrix} V_{cap1}(t) \\ V_{cap2}(t) \\ V_{cap3}(t) \\ V_{cap4}(t) \\ V_{cap5}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{c} T_s \begin{bmatrix} S_{c1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{c2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{c3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{c4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{c5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cap1}(t) \\ i_{cap2}(t) \\ i_{cap3}(t) \\ i_{cap4}(t) \\ i_{cap5}(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

即

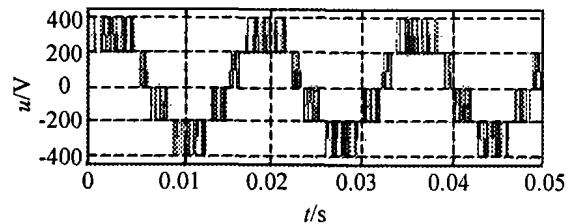
$$Y = CX + Du, D = 0 \quad (9)$$

因为传输支路总是从一条支路连接转移至另一条支路, 所以输出方程用电容电压和电容电流(支路电流)表示非常恰当

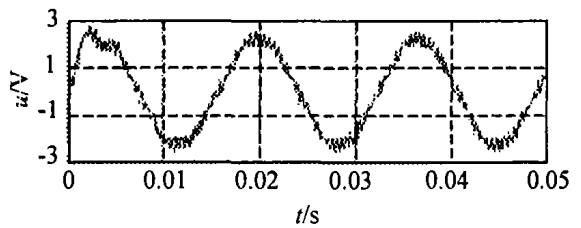
4.2 MMC 仿真

维持开关单元中点电容电压恒定(设定值的 $\pm 8\%$ 以内, 需单独控制)是 MMC 能量变换的前提。利用状态方程(3)和输出方程(9), 选择适当的矩阵 A, B, C , 由输出能控性定义可证明输出电容电压是能控的^[6]。因此利用可控的 V_{CAP} , 设 $V_{CAP} = +200V$, 不同的开关组合可合成五电平输出电压, 如 $+400V, +200V, 0V, -200V, -400V$ 。

对 MMC 输出电压和电流进行仿真, 仿真条件



(a) 输出线电压波形



(b) 输出相电流波形

图 3 输出线电压和相电流仿真

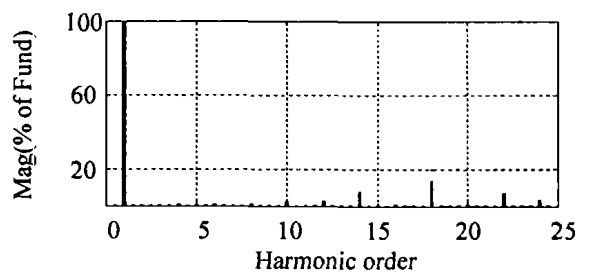


图 4 输出线电压谐波频谱

为: $V_{CAP} = +200\text{ V}$ 用恒压源代替, 并联RLC作为每相负载, 星型连接, 负载有功1 kW, 无功500 Var, $F = 60\text{ Hz}$, 相电压有效值200 V, 开关频率1 080 Hz 仿真结果如图3和图4所示 输出线电压的谐波频谱中基波占主要成分, 验证了MMC的良好性能

5 结 论

本文对三电平MC进行建模和仿真 三电平MC输出相电压波形比两电平MC多一个电平, 因而输出线电压波形更接近于正弦波, 谐波含量降低 MMC的开关器件多, 输出功率大, 适合大功率、高电压的场合, 但过多的器件在高频下工作时, 开关损耗大, 发热温升严重 超过三电平的变换器结构复杂, 对其建模和控制相对困难, 必须借助于计算机辅助分析 MMC对称性的结构类似于一个Cuk电路, 这一特性在交流励磁风力发电领域非常有用, 输入电压可随转子转速(风速)的变化而变化, 因而成为研究此类变换器的一个热点

参考文献(References):

- [1] Osama A, AlNaseem. Modeling and space vector control of a novel multilevel matrix converter for variable-speed wind power generators[D]. Colorado: University of Colorado, 2001.
- [2] Zhang L, W Athanasas C, Shepherd W. Application of a matrix converter for the power control of a variable-speed wind-turbine driving a doubly-fed induction generator[A]. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* [C]. Japan, 1994: 906-911.
- [3] Dengming Peng, Ferd C Lee, Dushan Boroyevich. A novel SVM algorithm for multilevel three-phase converters[A]. *2002 IEEE 33rd Annual, IEEE Power Electronics Specialists Conf* [C]. Australia, 2002: 2: 509-513.
- [4] Robert W Erickson, Osama A, AlNaseem. A new family of matrix converters[A]. *The 27th Annual Conf of the IEEE Industrial Electronics Society* [C]. USA, 2001: 1515-1520.
- [5] Takayoshi Matsuo, Steffen Bernet, Stephen R Colby, et al. Modeling and simulation of matrix converter/induction motor driver[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1998, 46: 175-195.
- [6] Katsuhiko Ogata. *Modern Control Engineering* [M]. The Fourth Edition. USA, Prentice Hall, 2001.

(上接第1158页)

5 结 论

本文说明了相互耦合的系统可看成是相互间具有可量测干扰的系统, 于是解耦问题则变成克服相互干扰的问题; 同时指出无模型控制方法具有很强的抗干扰能力, 所以它具有很好的解耦功能, 可实现对多变量耦合系统的直接非解耦控制 仿真比较和实际应用效果进一步证明了本文的结论

参考文献(References):

- [1] 韩京清, 许可康. 线性控制系统理论——构造性方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 高为炳. 非线性控制系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [3] 柴天佑. 多变量自适应解耦控制及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] Witemark B, Middleton R, Goodwin G C. A daptive decoupling of multivariable systems[J]. *Int J Control*, 1987, 46(6): 1993-2009.
- [5] Han Zhi-gang, Qin Bin. Direct adaptive control for nonlinear systems[J]. *System Analysis Modeling Simulation*, 1997, 28: 301-315.
- [6] 韩志刚. 无模型控制器的设计问题[J]. *控制工程*, 2002, 9(3): 19-22.
(Han Zhi-gang. Designing problem of model free controller[J]. *Control Engineering*, 2002, 9(3): 19-22.)
- [7] 韩志刚. 一类复杂系统非建模控制方法的研究[J]. *控制与决策*, 2003, 18(4): 398-402.
(Han Zhi-gang. Study on non-modelling control method for a class of complex systems[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 398-402.)
- [8] 韩志刚. 无模型控制器的应用[J]. *控制工程*, 2002, 9(4): 22-25.
(Han Zhi-gang. The application of model free controller[J]. *Control Engineering*, 2002, 9(4): 22-25.)