

三电平四桥臂有源滤波器在煤矿电网的应用

冯文轶

(永城煤电控股集团有限公司, 河南 永城 476600)

摘要: 针对煤矿电网电能质量低的问题, 提出一种电流谐波补偿装置, 即三电平四桥臂有源滤波器, 在传统两电平四桥臂空间矢量调制算法基础上, 采用将复杂三电平四桥臂空间矢量控制问题简化分解成基准电平状态选择和两电平四桥臂空间矢量控制 2 个部分进行设计的方法。针对煤炭电网中需要对指定次数谐波电流补偿的情况, 研究了基于分频控制思想的有源滤波器控制策略; 并通过仿真和试验进行了验证, 以五次谐波为例, 经过三电平四桥臂有源滤波器进行补偿后, 五次谐波含量下降约 70%, 证明了三电平四桥臂滤波器在矿井谐波补偿方面的可行性和优越性。

关键词: 煤矿电网; 有源滤波器; 电能质量; 三电平四桥臂; 三相四线制; 分频控制

中图分类号: TD67 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2014)08-0086-04

Application of Three - Level and Four Bridge - Arms Active Power Filter in Coal Mine Grid

FENG Wen-yi

(Yongcheng Coal and Electric Power Holding Group Corporation Limited, Yongcheng 476600, China)

Abstract: According to a low electric power quality problem existed in coal mine, a three - level and four bridge - arms power filter of current harmonic compensation device was provided. Based on a conventional two - level and four bridge - arms space vector modulation algorithm, the complicated three - level space vector control was simplified to two parts of a reference level state selection and a two - level and four bridge - arms space vector control for a design method. According to the given number harmonic current compensation condition required in the coal mine grid, a control strategy of an active power filter was studied based on the divided frequency control idea. The result was conducted with the simulation and experiment. Based on five harmonic as an example, after the compensation with the three - level and four bridge - arms active power filter, the five harmonic contents were reduced by about 70%. The feasibility and advantage of the three - level and four bridge - arms active power filter applied to the mine harmonic compensation was approved.

Key words: coal mine grid; active power filter; electric power quality; three - level and four bridge - arms; three - phase four - wire system; divided frequency control

0 引言

在煤矿行业中, 电能质量问题一直广受重视。实际在煤矿中存在大量的非线性负载, 使得电流发生畸变, 进而引起电网电压畸变。畸变的电压、电流中不仅含有与电网电压频率相同的基波电流分量, 还含有多个频率为基波电流频率整数倍的谐波电流。近年来, 电力电子技术逐步应用在煤矿中, 其发挥的作用也越来越重要。电力电子技术在煤矿中的

大量应用有明显的优点, 但是也存在着弊端, 因其具有能够提高电网运行稳定性、控制灵活、低损耗的优点, 而使煤矿更加有效地利用电能, 以获得较大的经济利益。同时会因其强非线性特点将向煤矿电网注入大量的谐波和无功功率, 造成电网电压和电流畸变, 降低电能质量。而有源滤波器 (APF, Active Power Filter) 的应用可解决煤矿电网谐波补偿问题^[1-2], 有源电力滤波器主要有三相三线制和三相四线制 2 种。对于电容中点式三相四线制有源滤波

收稿日期: 2014-03-15; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.08.022

作者简介: 冯文轶 (1965—), 男, 河南杞县人, 高级工程师, 硕士, 现任永城煤电控股集团有限公司副总经理。E-mail: fengwyym@sina.com

引用格式: 冯文轶. 三电平四桥臂有源滤波器在煤矿电网的应用[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(8): 86-89.

FENG Wen-yi. Application of Three - Level and Four Bridge - Arms Active Power Filter in Coal Mine Grid[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8): 86-89.

器,主电路拓扑和三相三线制基本相同,不需要对硬件进行大的投资就可以将三相三线制有源滤波器系统改造成四线制系统,然而三相四线制并联型三电平四桥臂有源滤波器可以应用于单相、二相和三相系统的各种不同的工况;它可以对各种不平衡负载进行谐波和无功的全补偿,也可以按照补偿要求进行选择性补偿,如只补偿谐波或只补偿无功,或者对指定次谐波电流进行全部或按比例补偿。研究三相四线制系统中谐波和三相不平衡问题对于煤炭行业具有重要意义^[3],因此笔者针对三相四线制补偿系统,介绍了三电平四桥臂并联型 APF 的基本工作原理,推导出三电平四桥臂并联型 APF 在不同坐标系下的数学模型;详述了适用于四桥臂结构有源电力滤波器的三维空间矢量调制算法;提出了在多同步坐标系下对指定次谐波电流的无静差控制策略。

1 三电平四桥臂有源滤波器结构与模型

并联型三电平四桥臂有源滤波器主电路拓扑结构如图 1 所示^[4]。

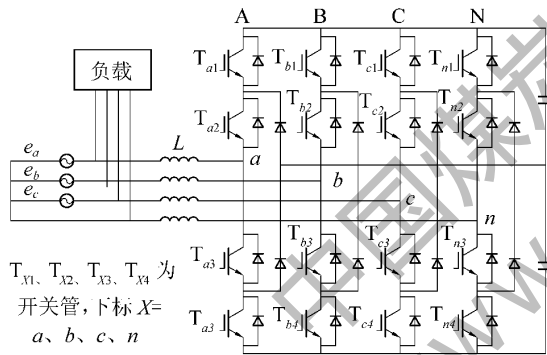


图 1 并联型三电平四桥臂有源滤波器主电路拓扑结构

设各相电流分别为 i_a, i_b, i_c, i_n , 电网电压为 e_a, e_b, e_c , 各桥臂的中点电压为 $v_{an}, v_{bn}, v_{cn}, v_{nN}$, 则根据图 1 有:

$$\begin{bmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \\ -di_n/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a/L \\ e_b/L \\ e_c/L \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{an}/L \\ v_{bn}/L \\ v_{cn}/L \\ v_{nN}/L \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: t 为时间变量; L 为 APF 输出电感。

根据基尔霍夫定律可知: $i_a + i_b + i_c - i_n = 0$, 则:

$$\begin{cases} di_a/dt = e_a/L - v_{an}/L - di_n/dt \\ di_b/dt = e_b/L - v_{bn}/L - di_n/dt \\ di_c/dt = e_c/L - v_{cn}/L - di_n/dt \\ i_n = i_a + i_b + i_c \end{cases} \quad (2)$$

其中 v_{an}, v_{bn}, v_{cn} 分别为 A、B、C 三个桥臂中点到第四桥臂 N 的中点之间的电压。

由式(2)可知,三相电流之间存在耦合,因此将 $a-b-c$ 三相静止坐标系下数学模型变换到 $\alpha-\beta-\gamma$ 两相静止坐标系下以实现解耦。已知 $a-b-c$ 坐标系到 $\alpha-\beta-\gamma$ 坐标系变换矩阵为^[5]

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

分别将静止坐标系下的 APF 三相电流 i_a, i_b, i_c , v_{an}, v_{bn}, v_{cn} 和电网电压 e_a, e_b, e_c 转化到 $\alpha-\beta-\gamma$ 坐标系下,得到:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_\gamma \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \\ e_\gamma \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

则可得到 $\alpha-\beta-\gamma$ 两相静止坐标系下三电平四桥臂有源滤波器数学模型为

$$\begin{cases} di_\alpha/dt = e_\alpha/L - v_\alpha/L \\ di_\beta/dt = e_\beta/L - v_\beta/L \\ 4di_\gamma/dt = e_\gamma/L - v_\gamma/L \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,电流量之间不存在耦合,即实现了解耦^[6-7]。

2 三电平四桥臂有源滤波器空间矢量调制

在三电平四桥臂逆变器空间矢量调制算法中,相比于三电平三桥臂,由于多了 1 个桥臂,电压矢量的轨迹由二维空间拓展到三维空间,算法复杂程度大幅增加。三电平三桥臂逆变器每个桥臂要输出状态为 -1、0、1 的 3 阶电平,每个桥臂有效开关状态为 3 个,共有有效开关状态 27 个。当增加 1 个桥臂后,有效开关状态变为 81 个,空间矢量的布局更加复杂。若按照传统方法采用三电平四桥臂 APF 中的变流器空间立体模型计算对应合成矢量的作用时间,则需要计算 24 个 3×3 矩阵的逆矩阵,加重控制器负担,将造成控制延迟^[8-9]。

根据参考电压分解的思想,可以将复杂的三电平四桥臂逆变器空间矢量控制问题,分解为一个基准电平状态选择和两电平四桥臂的空间矢量控制 2 个部分进行解决,从而解决了现有的调制策略普遍存在的复杂程度高的问题。该调制算法分解为 3 步:①对三相相对电压进行分解,由相对开关状态求解 4 个桥臂的绝对开关状态。②根据参考电压分解

后的小数部分,利用两电平四桥臂调制算法求得决定 A、B、C、N 各桥臂开关管开通时间的调制波形。

③根据第 1 步中求得的 4 个桥臂的绝对开关状态对第 2 步中调制波形进行修正,就可以得到三电平四桥臂的调制波形,解决了复杂开关矢量选择和作用时间计算问题。

根据图 1 所示的三电平四桥臂拓扑结构,以直流侧电容电压 $U_{dc}/2$ 为基准值进行标幺,定义开关矢量,即绝对开关矢量 S_X 如下^[10]:

$$S_X = \begin{cases} 1 & (T_{X1}, T_{X2} \text{ 导通}) \\ 0 & (T_{X2}, T_{X3} \text{ 导通}) \\ -1 & (T_{X3}, T_{X4} \text{ 导通}) \end{cases}$$

其中:下标 $X = a, b, c, n$ 。以 A 桥臂为例,则 $v_{an} = v_{aN} - v_{nN}$,令 $R_A = S_A - S_N$,可以得到新的开关矢量 $\{R_A, R_B, R_C\}$,其取值范围为 $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$,它是 A、B、C 桥臂相对 N 桥臂的输出电压矢量,称为相对开关矢量。1 个相对开关矢量有多个绝对开关矢量相对应,譬如相对开关矢量 $[-1, -1, -1]$ 对应着绝对开关矢量 $[0, 0, 0, 1]$ 和 $[-1, -1, -1, 0]$,所以对应于每个相对开关矢量的绝对开关矢量称为其冗余开关矢量。

在任一时刻 k ,令 $v_{an}(k) = l_a + v_{at}$,其中 l_a 为相对开关状态分量,定义为:

$$l_a = \begin{cases} 1 & (v_{an}(k) > 1) \\ -1 & (v_{an}(k) < -1) \\ 0 & (-1 \leq v_{an}(k) \leq 1) \end{cases} \quad (5)$$

v_{at} 为参考电压分解后的小数部分,定义为

$$\begin{cases} 0 < v_{at} \leq 1 & (v_{an}(k) \geq 0) \\ -1 \leq v_{at} < 0 & (v_{an}(k) < 0) \end{cases} \quad (6)$$

同样可以得到 B、C 桥臂中点对 N 桥臂中点的电压 v_{bn} 和 v_{cn} 。根据式 (5) 求得的相对开关状态各分量分别为: $R_A = l_a, R_B = l_b, R_C = l_c$ 。根据上述分析要求,可以确定 N 桥臂开关状态矢量 S_N 的转换式为

$$S_N = \begin{cases} \text{INT}(-S_{\min}/2) & (S_{\max} < 0) \\ \text{INT}(-S_{\max}/2) & (S_{\min} > 0) \\ \text{INT}[-(S_{\max} + S_{\min})/2] & (\text{其他}) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $S_{\max} = \max(R_A, R_B, R_C)$; $S_{\min} = \min(R_A, R_B, R_C)$ 。A、B、C 三个桥臂的相对开关状态矢量 S_A, S_B, S_C 和 N 桥臂的绝对开关状态矢量 S_N 见表 1,进而可以得到 A、B、C、N 四个桥臂的绝对开关状态矢量 S_A, S_B, S_C, S_N ,见表 2。A、B、C 三个桥臂的绝对开关状态矢量分别为: $S_A = R_A + S_N, S_B = R_B + S_N,$

$$S_C = R_C + S_N。$$

由上述分析可以得到相对开关状态和绝对开关状态,便可以根据参考电压分解后小数部分,利用两电平四桥臂调制算法求得决定 A、B、C、N 各桥臂开关管开通时间的调制波形^[11-13]。

表 1 相对开关状态矢量和绝对开关状态矢量 S_N

相对开关状态矢量				S_N	相对开关状态矢量				S_N
S_A	S_B	S_C	S_N		S_A	S_B	S_C	S_N	
1	1	0	-1		0	0	-1	1	
1	1	1	-1		0	-1	1	0	
1	1	-1	0		0	-1	0	1	
1	0	1	-1		0	-1	-1	1	
1	0	0	-1		-1	0	1	0	
1	-1	-1	0		-1	1	0	0	
1	-1	1	0		-1	1	-1	0	
1	-1	0	0		-1	1	1	0	
1	0	-1	0		-1	0	0	1	
0	1	0	-1		-1	-1	0	1	
0	1	1	-1		-1	-1	1	0	
0	1	-1	0		-1	0	-1	1	
0	0	1	-1		-1	-1	-1	1	
0	0	0	0		—	—	—	—	

表 2 A、B、C、N 桥臂绝对开关状态矢量

S_A	S_B	S_C	S_N	S_A	S_B	S_C	S_N	S_A	S_B	S_C	S_N
0	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	1	1	0
0	0	0	-1	-1	0	0	-1	-1	1	0	0
1	1	-1	0	0	1	-1	0	-1	1	-1	0
0	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	1	0	0	1
0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	1	1	1
1	-1	-1	0	1	1	0	1	0	0	1	1
1	-1	1	0	0	-1	1	0	-1	-1	1	0
1	-1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1
1	0	-1	0	-1	0	1	0	0	0	0	1

3 无静差分频控制策略

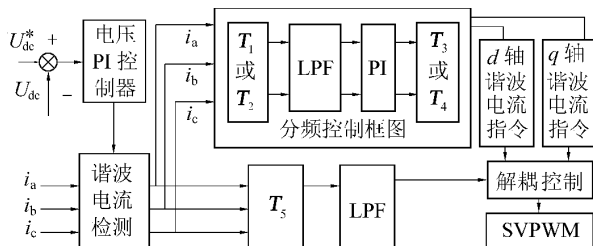
有源滤波器给定电流指令是基波电流及多个其他次数的谐波电流叠加信号。因此,对 n 次谐波补偿需将其提取出来,将其从 $a-b-c$ 坐标系变换到旋转角频率为 n 倍基波旋转角频率的同步旋转坐标系下。 n 次谐波电流由静止坐标系到正序谐波旋转坐标系的变换矩阵 T_1 为

$$T_1 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(n\omega t) & \cos(n\omega t - 2\pi/3) & \cos(n\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin(n\omega t) & -\sin(n\omega t - 2\pi/3) & -\sin(n\omega t + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

n 次谐波谐波由静止坐标系到负序谐波旋转坐标系的变换矩阵如下:

$$T_2 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(n\omega t) & \cos(n\omega t + 2\pi/3) & \cos(n\omega t - 2\pi/3) \\ -\sin(n\omega t) & -\sin(n\omega t + 2\pi/3) & -\sin(n\omega t - 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

其中 ω 为基波旋转角频率。对指定次谐波电流检测和补偿系统框图如图 2 所示。对 n 次谐波电流通过正序或负序旋转坐标变换, 经低通滤波器滤出直流分量, 提取出的 n 次谐波电流信号已经转换为直流信号, 即可通过 PI 控制器实现无静差控制。



T_3 、 T_4 分别为将谐波电流由正序、负序谐波旋转坐标

系到静止坐标系的变换矩阵; T_5 为谐波电流

由 abc 坐标系转换到 dq 坐标系的变换矩阵

图2 对指定次谐波电流检测和补偿系统框图

4 三电平四桥臂有源滤波器试验

为了验证有源滤波器对指定次谐波电流补偿控制策略的可行性, 采用 MATLAB/SIMULINK 软件进行仿真分析, 并在 180 V 煤矿电网下对三电平四桥臂有源电力滤波器进行试验验证, 试验条件参数如下:

电网线电压(50 Hz)/V	180
APF 输出侧电感/mH	1.5
直流母线总电容/MF	2 200
不控整流交流侧电感/mH	0.45
不控整流直流侧电阻/ Ω	4
系统采样频率/kHz	12.5
系统开关频率/kHz	12.5
APF 直流母线电压给定值/V	400

补偿 5 次谐波电流前后 A 相直流母线电压 V_{dc} , A 相网侧电流 I_{sa} 及有源滤波器 A 相输出电流 i_a 的波形如图 3 所示。

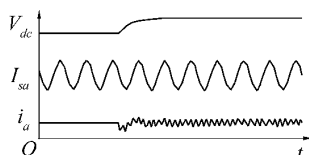


图3 补偿 5 次谐波电流前后 V_{dc} 、 I_{sa} 、 i_a 波形

由图 3 可知, 有源滤波器投入使用时, 能够快速

跟踪控制, 经过 2 个周期左右进入稳定状态, 取得了较好的动态补偿效果。另外, 试验数据表明补偿后 5 次谐波含量由 21.3% 降至 1.5%, 电流畸变率降至 7.4%, 可见无静差分频控制方法具有较好的控制效果。

5 结 论

以三电平四桥臂有源滤波器为研究对象对调制算法和指定次谐波电流补偿控制技术进行了深入研究。对并联型三电平四桥臂有源滤波器的基本工作原理和拓扑结构进行分析, 在分析传统两电平四桥臂空间矢量调制算法的基础上, 研究了基于分解思想的三电平四桥臂矢量调制算法以及基于分频控制思想的有源滤波器控制算法。最后通过仿真以及在煤矿电网中的试验, 验证了三电平四桥臂有源电力滤波器在煤矿电网中应用的可靠性与有效性。

参考文献:

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 陈国柱, 吕征宇, 钱照明, 等. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 17-21.
- [4] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [5] John Stone, Alan Collinson. Power Quality[J]. Power Engineering Journal, 2001(4): 58-64.
- [6] 卓放. 三相四线制有源电力滤波器的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2001.
- [7] 卓放, 杨君, 胡军飞, 等. 三相四线制有源电力滤波器主电路的结构形式与控制[J]. 电工电能新技术, 2000(2): 1-6.
- [8] 乐健, 姜齐荣, 韩英铎. 并联型四桥臂有源电力滤波装置的研制[J]. 电气技术, 2006(8): 14-19.
- [9] Villalva M G, Ruppert F E. 3D - Space Vector PWM for Three - Leg Four - Wire Voltage Source Inverters[C]//2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004: 3946-3951.
- [10] WONG Man - chung, ZHAO Zheng - yi, HAN Ying - duo, et al. Three - dimensional Pulse - width Modulation Technique in Three - level Power Inverters for Three - phase Four - wired System[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 16(3): 418-427.
- [11] 顾建军, 徐殿国, 刘汉奎, 等. 有源滤波技术现状及其发展[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(2): 126-132.
- [12] 周娟. 四桥臂有源电力滤波器关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [13] 陈坚. 电力电子学: 电力电子变换与控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.