

大容量链式 STATCOM 的三角载波移相—开关频率 最优 PWM 法控制策略的研究

王立杰, 孙玉坤, 孙运全, 刘永敏

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 提出了适用于大容量链式静止无功发生器 (STATCOM) 的一种新的脉冲控制策略, 即三角载波移相—开关频率最优 PWM 法 (PS-SFO-PWM)。这种新的 PWM 方法兼具三角载波移相 PWM 法 (PSPWM) 法和开关频率优化 PWM 法 (SFOPWM) 的优点, 在不提高开关频率的情况下, 实现等效高频载波的效果, 并提高了直流电压的利用率。研究了链式多电平逆变器的 PS-SFO-PWM 技术, 给出了 PS-SFO-PWM 控制方法的基本算法, 并以 2 个 H 桥串联的 5 电平链式多电平变换器为例, 通过 Matlab 仿真, 验证了方法的正确性。

关键词: 链式多电平逆变器; STATCOM; PS-SFO-PWM 法; 牛顿迭代法

PS-SFO-PWM control for high-power STATCOM employing cascade multilevel inverters

WANG Li-jie, SUN Yu-kun, SUN Yun-quan, LIU Yong-min

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A new PWM strategy for cascade static synchronous compensator (STATCOM), called triangular carrier phase shifting-switch frequency optional PWM (PS-SFO-PWM), is presented. The new PWM strategy has both Triangular carrier phase shifting PWM (PSPWM) and switch frequency optional PWM (SFOPWM), which can bring the same effect of high frequency carrier without increase switch frequency, and at the same time improve the use of DC side voltage. Based on the research of PS-SFO-PWM, basic arithmetic of PS-SFO-PWM is proposed in this paper. The method of obtaining initial values by adding single H-bridge switching angles is presented. The improved method is verified by simulating a five-level cascade inverters composed of two series H-bridges based on MATLAB.

Key words: cascade multilevel inverters; STATCOM; PS-SFO-PWM; Newton iteration method

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)03-0041-04

0 引言

近年来, 在 STATCOM 系统中, 多电平逆变器降低了开关元件的耐压和开关过程中的 dv/dt , 省去了多重化变压器, 改善了输出波形, 引起了人们越来越多的重视。在多电平逆变器拓扑电路中, 链式逆变器具有开关频率低、需要最少数量的器件、可实现模块化和易于采用软开关技术等优点, 受到人们的广泛关注。与之相对应的多电平逆变器 PWM 控制技术的也成为研究热点, 并根据所要达到的

不同的控制目的提出了许多 PWM 控制方法。

三角载波移相 PWM 法 (PSPWM) 是将自然采样 SPWM 技术与多重化结构相结合, 通过不同模块三角载波的相移, 在不提高开关频率的情况下, 实现等效高频载波的效果。文献 [1, 2] 给出了基于三角载波移相 PWM 方法的链式多电平变换器的 STATCOM 的控制策略, 通过仿真研究, 取得了满意的控制效果。但是, 由于三角载波移相 PWM 法载波调制比最大为 1^[6], 使得直流电压利用率不高。开关频率优化 PWM 法 (SFOPWM) 通过向调制波中注入零序分量, 可以提高直流电压的利用率^[6, 7]。将两种方法相结合形成的三角载波移相—开关频率最优 PWM 法 (PS-SFO-PWM)^[6, 7] 兼具 PSPWM 法和 SFOPWM 法的优点, 非常适

基金项目: 江苏省高新技术项目 (BG2004024); 江苏省教育厅博士创新项目 (1223000017)

合于采用链式多电平逆变器的静止无功发生器 (STATCOM)。本文研究了链式多电平 STATCOM 的 PS-SFO-PWM 技术, 给出了 PS-SFO-PWM 法的基本算法, 并以 2 个 H 桥串联的 5 电平链式多电平变换器为例, 通过 Matlab 仿真, 验证了方法的正确性。

1 三角载波移相—开关频率最优 PWM 控制策略

1.1 链式 STATCOM 的 PS-SFO-PWM 法控制原理

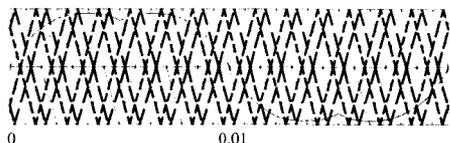


图 1 PS-SFO-PWM 法原理图

Fig.1 PS-SFO-PWM switching scheme

链式 STATCOM 普遍采用的三相 Y 接级联多电平逆变器主电路拓扑中, 每一相由若干个具有独立直流电容的 H 桥串联而成^[1,2]。同一相每个 H 桥分别采用 SPWM 调制方法, L 个 H 桥共用一频率为 f 的正弦调制波, 三角载波频率同为 f_s , 依次相移电角度 $\theta = \pi/4k_c$ (载波比 $k_c = f_s/f$), 这一相移使各模块产生的 SPWM 脉冲在相位上错开, 从而使各模块最终迭加输出的 SPWM 波的等效载波比 $k_{eff} = L \cdot k_c$ (L 个 H 桥串联), 等效开关频率提高到 Lf_s , 故可在不提高开关频率的条件下大大减小输出谐波。这种调制方法也就是所谓的三角载波移相 PWM 法。文献[3]研究指出针对级联式逆变器, 三角载波移相 PWM 法采用载波移相 $180^\circ/N$ 方式的消谐效果优于载波移相 $360^\circ/N$ 方式 (N 为级联数目)。本文的研究计算都是采用的载波移相 $180^\circ/N$ 方式。

向上述三角载波移相 PWM 法 SFOPWM 的正弦调制波中注入零序分量, 就实现了 PSPWM 法与 SFOPWM 法的结合, 形成了三角载波移相—开关频率最优 PWM 法 (图 1)。对于一个三相系统, 这个零序分量是三相正弦波瞬态最大值和最小值的平均值, 所以 SFOPWM 法的调制波是通常的三相正弦波减去零序分量后所得到的波形。零序分量和三相调制波的计算公式为

$$V_{zero} = \frac{\max(V_a, V_b, V_c) + \min(V_a, V_b, V_c)}{2} \quad (1)$$

$$V_a^* = V_a - V_{zero} \quad (2)$$

$$V_b^* = V_b - V_{zero} \quad (3)$$

$$V_c^* = V_c - V_{zero} \quad (4)$$

由于注入零序分量产生的三次谐波在三相系统中可以相互抵消, 所以不会对系统谐波产生影响。

1.2 H 桥的非线性方程的建立

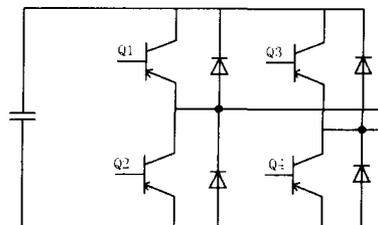


图 2 单个 H 桥电路图

Fig.2 Circuit of single H-bridge

链式多电平逆变器单个 H 桥功率单元如图 2 所示。Q1 与 Q2, Q3 与 Q4 是反相关系, 开关管开断与单个 H 桥电平输出关系可以做以下简单描述: Q1 导通, Q3 关断时输出电平为 1; Q3 导通, Q1 关断时输出电平为 -1; Q1, Q3 同时导通或关断时输出电平为 0。

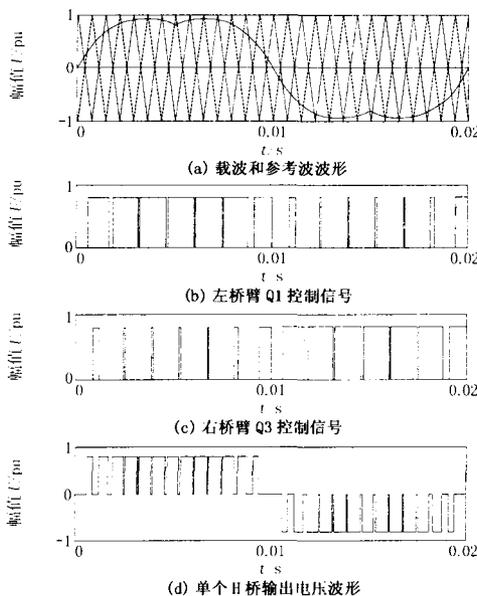


图 3 功率单元 PWM 控制原理图

Fig.3 PWM control diagram of power cell

单个 H 桥 PWM 控制原理如图 3 所示^[4]。左右桥臂的三角载波互差 180° , Q1 的控制信号由参考波与正相载波 (图 3(a) 中实线三角波) 比较得到。当参考波大于正相载波时 Q1 导通, Q2 截止, 输出高电平; 反之 Q1 截止, Q2 导通, 输出低电平。将 Q1 的控制信号反相得到 Q2 的控制信号。右桥臂 Q3 的控制信号由参考波与反相载波 (图 3(a) 中虚线三

角波)比较得到。当参考波小于反相载波时, Q3 导通、Q4 截止, 输出高电平; 反之 Q3 截止, Q4 导通, 输出低电平。将 Q3 的控制信号反相得到 Q4 的控制信号。左、右桥臂控制信号之差得到的波形同整个单元输出的电压波形相同(图 3(d))。将参考信号分别右移或左移 120° 并与载波相比较可得 B 相和 C 相各单元的控制信号。

设定 A 相由 L 个 H 桥串联而成, 载波比为 N , 即半个周期内的脉冲个数为 N 。参考 SPWM 的开关点的计算方法, 可以列出计算第一个 H 桥功率管 Q1 的开关点的方程式组。

$$y_1 = m(\sin \omega x_1 + \frac{1}{4} \sin 3\omega x_1) = \frac{(t + \frac{\Delta t}{4}) - x_1}{\frac{\Delta t}{4}} \quad (5)$$

$$y_2 = m(\sin \omega x_2 + \frac{1}{4} \sin 3\omega x_2) = \frac{x_2 - (t + \frac{3\Delta t}{4})}{\frac{\Delta t}{4}} \quad (6)$$

其中: $t = \frac{1}{\omega}(\frac{k\pi}{N} - \frac{\pi}{N})$; $\Delta t = \frac{1}{\omega}(\frac{\pi}{N})$ 。 k 为第 k 个脉冲; m 为调制度。

由于 A 相其它 H 桥与第一个 H 桥的调制波相同, 三角载波依次相移角度 $180^\circ / 2NL$, 所以只要改变 t 的值, 就可以列出其它 H 桥的功率管 Q1 的开关点的计算方程式组。设定 l 为顺序第 l 个 H 桥, 对应的

$$t = \frac{1}{\omega}(\frac{k\pi}{N} - \frac{\pi}{N} + \frac{\pi}{2NL})$$

就可以得到此 H 桥的功率管 Q1 的开关点的计算方程式组。参考 A 相的方法, 将调制波信号分别右移或左移 120° , 就可以得到 B 相和 C 相各单元的功率管 Q1 开关点方程。同理, 考虑 Q3 与 Q1 相差 $\pi / 2N$, 也就可以列出 Q3 开关点的计算方程。不过, 由于 Q3 的控制信号由参考波与反相载波比较得到, 所以列方程时要注意加解的值与开关的对应性。

1.3 非线性方程组的求解

式(5)、(6)是由三角函数构成的超越方程组, 一般只能用牛顿迭代法求解。由以往文献可知, 在 N 、 L 和初值确定的情况下, 当 m 连续变化时, 方程组的解可表示为一组以初值为起始点随 m 变化的光滑的曲线。但是, 在实际中, 是在 m 离散点上用数值方法来求取方程组的数值解。因此, 求取的开关角是离散的。

对于该非线性方程组, 通常使用牛顿—拉夫逊算法。这样, 就需要一个初值。同时, 这个初值的选取与最后迭代的结果是否收敛有直接的关系。因

此, 初值的选取非常重要。同时, 收敛范围随着 N 、 L 和 m 的变化, 也是变化的。同时, 不同的取值收敛范围是不同的。文献[6]给出了 m 的取值最大可达到 1.15 以上。

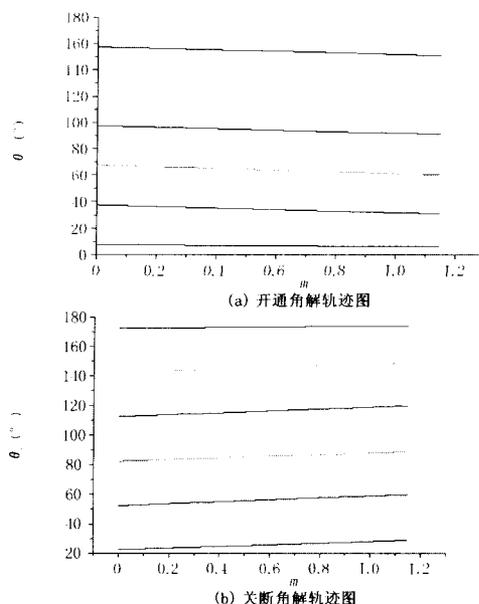


图 4 解轨迹图

Fig.4 Trajectory of switching angles

由于是两个 H 桥的叠加, 选取一个 H 桥在 $N=6$ 情况下, 以文献[5]的方法, 得到使用 PS_SFO_SPWM 方法的半个周期的 6 个开通角度和 6 个关断角度的初始值, 进行初值的迭代运算, 得到的迭代结果作为初值。然后, 利用牛顿—拉夫逊算法的局部收敛性, 以步长为 $\Delta m = 0.01$ 改变 m , 将上次的迭代结果依次作为下个改变后 m 的迭代初值, 最终得到迭代结果, 求出所有的开关角组。图 4(a) 给出了 m 在 $0 \sim 1.15$ 范围内的开通角解轨迹, 图 4(b) 给出了 m 在 $0 \sim 1.15$ 范围内的关断角解轨迹。

根据图形的对称关系及相移特性, 按照 1.2 中所述, 可以列出各 H 桥 Q1、Q3 的开关点方程式组。由于方程形式类似, 所以运用上述相同的解法, 就可以解出全部开关角度。

2 三角载波移相—开关频率最优 PWM 控制仿真研究

为了研究上述三角载波移相—开关频率最优 PWM 控制的谐波消除效果, 采用 Matlab 仿真软件对 5 电平链式多电平逆变器进行仿真研究。取 $E=2000$ V (单个 H 桥直流电容电压)、 $N=6$ 、 $L=2$ 和 $m=1$, 电压仿真波形如图 5(a) 和图 5(c) 所示。从图 5(b)

中所示的相电压仿真波形频谱分析中可以看出, 低次谐波除了 3 次谐波基本上已经被消除, 只有 $L \cdot N = 24$ 次及其边带谐波较高, 总的电压谐波畸变率很小。从图 5(d) 中所示的线电压仿真波形频谱分析中可以看出, 3 次谐波在三相系统中相互抵消了。在单个 H 桥载波频率并不高的情况下, 总的等效开关频率提高到 $2f_s$, 故可在不提高开关频率的条件下大大减小输出谐波。

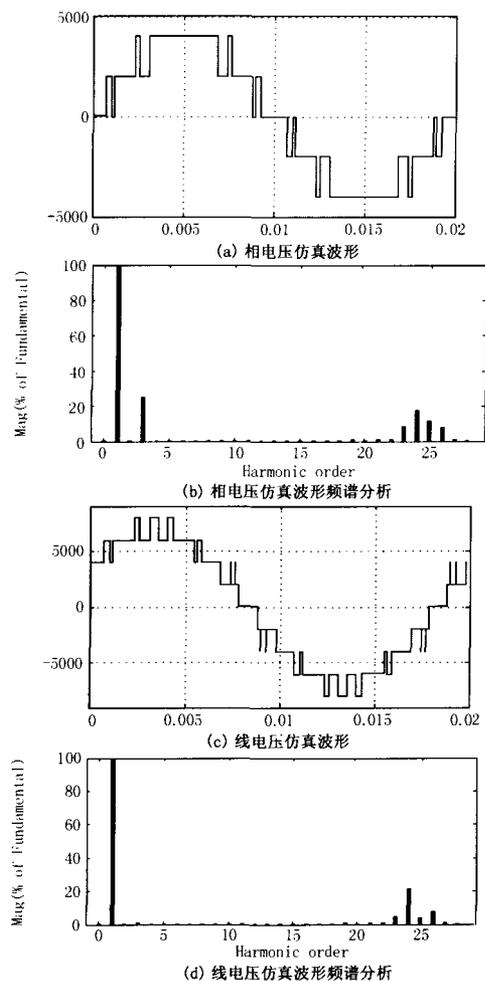


图 5 $m=1$ 的五电平仿真波形结果

Fig.5 Simulations waveforms of five-level voltage ($m=1$)

3 结论

通过仿真实验表明, PS-SFO-PWM 方法能够在不提高各个 H 桥开关频率的情况下, 有效提高了载波频率; 输出波形直流电压利用率较高; 开关频率低, 所需开关器件耐压低; 输出波形质量高, 谐波消除理想。随着链式串联 H 桥的个数和每个 H 桥开关角度个数的增加, 可消除的谐波个数分别成 L 倍和 N 倍个数的增加。

这样, 随着新型开关管 IGCT 的使用, 可以通过不增加串联 H 桥个数的情况下, 大量增加开关角的个数来实现更高质量的波形输出, 有较高的实际应用价值。

参考文献

- [1] XU Xiang-lian, ZOU Yun-ping, DING Kai, et al. Cascade Multilevel Inverter with Phase-shift SPWM and Its Application in STATCOM[A]. In: The 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society [C]. Busan:2004.
- [2] LIANG Yi-qiao, Co N. A New Type of STATCOM Based on Cascading Voltage-source Inverters with Phase-shifted Unipolar SPWM [J]. IEEE Trans on Industry Application, 1999,35(5):1118-1123.
- [3] 姜旭, 肖湘宁, 尹忠东, 等. 基于载波移相 SPWM 级联式变换器输出谐波分析[J]. 电力电子技术, 2005, 39(5):60-62.
JIANG Xu, XIAO Xiang-ning, YIN Zhong-dong, et al. Harmonic Analysis for Cascade Multi-level Converter based on Carrier-Shifted SPWM[J]. Power Electronics, 2005,39(5):60-62.
- [4] 朱凌, 刘涛, 鲁志平, 等. 基于 DSP 的载波移相多电平 PWM 实现方法[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(5):22-26.
ZHU Ling, LIU Tao, LU Zhi-ping, et al. Realization of Multilevel Carrier Phase-shifting PWM based on DSP[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004,31(5):22-26.
- [5] 刘文华, 宋强, 陈远华, 等. NPC 逆变器 SHE-PWM 开关角度的计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11):32-35.
LIU Wen-hua, SONG Qiang, CHEN Yuan-hua, et al. A Method of Solution to Selective Harmonic Eliminated PWM Switching Angles for NPC Inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(11):32-35.
- [6] 王鸿雁. 多电平逆变器 PWM 新方法及相关技术, 博士学位论文[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
WANG Hong-yan. Multilevel Inverter PWM Methods and Relative Techniques. Doctoral Dissertation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [7] 吴洪洋, 何湘宁. 级联型多电平变换器 PWM 控制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8):43-47.
WU Hong-yang, HE Xiang-ning. Research on PWM Control of Acascade Multi Level Converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(8):43-47.

收稿日期: 2006-07-13; 修回日期: 2006-11-09

作者简介:

王立杰(1977-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术和无功补偿的智能控制技术; E-mail: tiandirenai@sina.com

孙玉坤(1958-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为电能质量和电机智能控制等;

孙运全(1969-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力与电能。