多重化逆变器的一种控制方法研究

索 迹,祁春清

(苏州市职业大学 电子信息工程系,江苏 苏州 215104)

摘要: 多重化结构逆变器是一种新型结构的逆变器,该逆变器各功率单元构造相同,便于模块化设计和制造,系统可靠性高。各单元的输出通过功率变压器的耦合叠加实现高压输出,适合高压大功率场合。研究了多重化逆变器的一种控制方法,采用逆推的方法确定各单元的触发脉冲,通过多重移相叠加原理得到正弦波输出。能够应用较少的功率器件和较少的功率单元得到多电平的合成波,输出波形更加逼近正弦波,谐波含量小。应用 Matlab 软件进行仿真分析,验证了设计的合理性。

关键词: 多重化; 功率单元; 多重移相叠加

中图分类号: TM 464 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)11-0052-03

1 多重化逆变器结构

多重化结构是 1999 年德国学者 Cengelei E 等人提出的一种基于单元串联高压变频结构的电磁耦合式多电平电路[1]。其主要思想是通过变压器耦合的方式将多个常规逆变单元输出叠加,实现高电压输出。多重化逆变器结构示意图如图 1 所示。

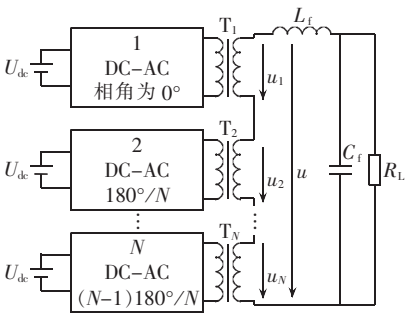

图 1 多重化逆变器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of multiunit inverter

多重化逆变器的逆变单元是 H 桥逆变器,输出方波或矩形波,根据多重移相叠加原理依次相移 π/N 角度[2]。输出变压器可以由 N 台单相变压器或 $N/3$ 台三相变压器组成,也可以是 1 台 N 合一变压器。输出变压器提高了系统输出电压,实现了输入/输出的电气隔离和输出的串级叠加。多重化逆变器是由无输出变压器的多单元逆变器演化而来的,既继承了多单元结构模块化的优点,又使用较少的逆变单元实现了高压大功率输出,减少了直流电源和功率器件的数量,输出波形质量也得到了改善[3-4],在现代工业控制中具有很好的发展前景。

2 合成波输出规律

多重化逆变器属于阶梯波合成逆变器,由 N 个依次相移 π/N 的逆变单元输出的方波或矩形波叠加得到合成波,即多重移相叠加法[5]。多重化逆变器输出阶梯波的阶高按正弦规律变化,谐波含量比方波或矩形波的谐波含量显著减少,阶梯波数目越多,波形越接近正弦波,谐波含量就越小[6]。

根据多重移相叠加法,设 N 个单元输出 N 个依次相移 π/N 的方波电压分别为 u_1、u_2、…、u_N,其初始相位分别为 $\varphi_1=0,\varphi_2=\pi/N,\cdots,\varphi_N=(N-1)\pi/N$。多重化逆变器的输出侧得到的电压为

$$u=u_1+u_2+u_3+\cdots+u_N$$

如果逆变单元的直流输入电压相同(全部为 U_{dc}),功率变压器的变比相同,则每相电压可以达到的最大值 u_{pmax} 和最小值 u_{pmin} 分别为

$$u_{pmax}=+NU_{dc},\quad u_{pmin}=-NU_{dc}$$

当逆变单元方波输出(即只输出 2 电平 $+U_{dc}$ 和 $-U_{dc}$)时,由于逆变单元输出 2 电平,输出电压没有"0"电平,所以每相功率单元的输出电平叠加在一起时每升高或降低一个"台阶"就要跨过 2 个电平而不是 1 个电平。因此,每相电压可以实现的电平数 m 为

$$m=(u_{pmax}-u_{pmin})/(2U_{dc})+1=N+1$$

可实现的电平集合为

$(+NU_{dc},\cdots,+4U_{dc},+2U_{dc},0,-2U_{dc},-4U_{dc},\cdots,-NU_{dc})$($N$ 为偶数时)或 $(+NU_{dc},\cdots,+3U_{dc},+U_{dc},-U_{dc},-3U_{dc},\cdots,-NU_{dc})$($N$ 为奇数时)

逆变回路接成三角形(△)时,由于线电压等于相电压,此时线电压的电平数和电平集合都与相电压的分析结果相同;逆变回路接成星形(Y)时,每相电压可以实现的电平数 m' 为

$$m'=(u_{pmax}-u_{pmin})/U_{dc}+1=2N+1$$

可实现的电平集合为

$(+2NU_{dc},\cdots,+4U_{dc},+2U_{dc},0,-2U_{dc},-4U_{dc},\cdots,-2NU_{dc})$

这样,逆变单元 2 电平输出时多重化逆变器的输出规律是:N 单元串联合成波相电压是 $N+1$ 电平;线电压是 $N+1$ 电平(△接时)或 $2N+1$ 电平(Y 接时)。

当逆变单元矩形波输出(即输出 3 电平 $+U_{dc}$、0 和 $-U_{dc}$)时,由于每相功率单元的输出电平叠加在一起时每升高或降低一个"台阶"就要跨过 1 个电平。因此,每相电压可以实现的电平数 m 为

收稿日期:2006-02-22;修回日期:2006-04-10

$$m=(u_{pmax}-u_{pmin})/U_{dc}+1=2N+1$$

可实现的电平集合为

$$(+NU_{dc},\cdots,+2U_{dc},+U_{dc},0,-U_{dc},-2U_{dc},\cdots,-NU_{dc})$$

逆变回路接成三角形(△)时,由于线电压等于相电压,此时线电压的电平数和电平集合都与相电压的分析结果相同;逆变回路接成星形(Y)时,每相电压可以实现的电平数 m' 为

$$m'=2(u_{pmax}-u_{pmin})/U_{dc}+1=4N+1$$

可实现的电平集合为

$$(+2NU_{dc},\cdots,+(N+1)U_{dc},+NU_{dc},\cdots,+2U_{dc},+U_{dc},0,-U_{dc},-2U_{dc},\cdots,-NU_{dc},-(N+1)U_{dc},\cdots,-2NU_{dc})$$

这样,逆变单元 3 电平输出时多重化逆变器的输出规律是:N 单元串联合成波相电压是 $2N+1$ 电平;线电压是 $2N+1$ 电平(△接时)或 $4N+1$ 电平(Y接时)[7-8]。

3　控制方法的提出

前面研究的多重化逆变器,由于各单元直流输入电压和变压器的变压比相同,逆变器合成波电平数限制在一定范围内,要想增加合成波的电平数只能增加逆变单元数目[9]。为使用较少的逆变单元得到尽可能多的合成波电平数,提出一种新的控制方法。

该方法中多重化逆变器各单元变压器的变压比不同,变压器不仅起到输出升压、隔离、串级叠加的作用,而且还将不同单元电压升高到不同电压等级,使合成波得到更多的电平[10]。

例如,逆变单元 $N=3$,3 组变压器的变压比分别为 13.5、4.5、1.5,变压器输入的 3 电平为 0、$\pm U_{dc}$,则输出的三电平分别为 0、$\pm 13.5U_{dc}$,0、$\pm 4.5U_{dc}$,0、$\pm 1.5U_{dc}$。输出采用串级叠加方式,合理安排逆变单元的 1、2、3 的 6 路门极信号,可使输出电平数达到 $C_3^1\cdot C_3^1\cdot C_3^1=27$ 种,分别为 0、$\pm 1.5U_{dc}$、$\pm 3U_{dc}$、$\pm 4.5U_{dc}$、$\pm 6U_{dc}$、$\pm 7.5U_{dc}$、$\pm 9U_{dc}$、$\pm 10.5U_{dc}$、$\pm 12U_{dc}$、$\pm 13.5U_{dc}$、$\pm 15U_{dc}$、$\pm 16.5U_{dc}$、$\pm 18U_{dc}$、$\pm 19.5U_{dc}$。选取这 27 种电平中的全部或部分电平,合理安排各电平在各工频周期中的分布,就可用其中的 $2n+1(n=1,2,3,\cdots,13)$ 电平拟合出谐波含量较小的正弦波。如令 $n=5$,则 $2\times5+1=11$,就能产生 11 个电平,而前面讨论的常规方法只能产生 $2\times3+1=7$ 个电平;令 $n=13$,则 $2\times13+1=27$,即最多可以产生 27 个电平,比前面讨论的只能产生 7 个电平要多出 20 个电平。

如果逆变单元 $N=4$,3 组变压器的变比分别为 k_1、k_2、k_3、k_4,变压器输入的 3 电平为 0、$\pm U_{dc}$,则输出的 3 电平分别为 0、$\pm k_1U_{dc}$,0、$\pm k_2U_{dc}$,0、$\pm k_3U_{dc}$,0、$\pm k_4U_{dc}$。输出电平数可以达到 $C_3^1\cdot C_3^1\cdot C_3^1\cdot C_3^1=3^4$ 种。逆变单元 2 电平输出时,变压器输入的 2 电平为 $\pm U_{dc}$,则输出的 2 电平分别为 $\pm k_1U_{dc}$、$\pm k_2U_{dc}$、$\pm k_3U_{dc}$、$\pm k_4U_{dc}$,输出电平数可达到 $C_2^1\cdot C_2^1\cdot C_2^1\cdot C_2^1=2^4$ 种。

因此,N 单元多重化逆变器在逆变单元 2 电平输出时合成波的电平数为 2^N 种,成 2 的几何级数增长;在逆变单元 3 电平输出时合成波的电平数为 3^N 种,成 3 的几何级数增长,即这种结构可以使用较少的单元合成含有较多电平数目的阶梯波,输出波形更加接近正弦波[11]。

4　触发脉冲的要求

采用逆推方法确定各单元触发脉冲。以 3 个逆变单元即 $N=3$ 为例,令 3 台功率变压器的变压比为 13.5、4.5、1.5,取 $n=6$,得出合成波应该包含的 13 个电平组合(0、$\pm 1.5U_{dc}$、$\pm 3U_{dc}$、$\pm 4.5U_{dc}$、$\pm 6U_{dc}$、$\pm 7.5U_{dc}$、$\pm 9U_{dc}$),则可得到合成波的理论波形(1/2 周期各单元输出波形 $u_1\sim u_3$ 和合成波波形 u 见图2),再由某一时刻理论波形所推算出该时刻 3 个单元输出状态(1/4 周期内各单元的输出状态见表 1),如 $+7.5U_{dc}$ 是由第 1 个单元的负半周($-1.5U_{dc}$)、第 2 个单元负半周($-4.5U_{dc}$)和第 3 个单元正半周($+13.5U_{dc}$)导通所得;最后,由各单元在某一时刻的导通状态算出每个单元在该时刻的触发脉冲,按照算出的触发脉冲控制各单元的输出就可得到符合要求的阶梯波。

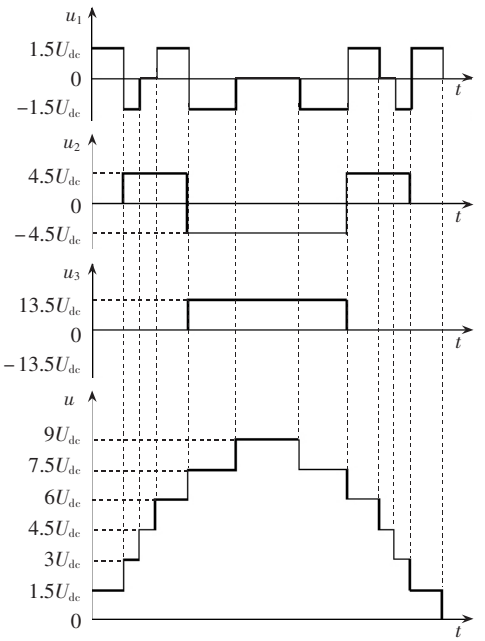

图 2　逆变单元和合成波波形

Fig.2 Inverter unit waves and their complex wave

表 1　各单元输出状态

Tab.1 Output states of each power unit

N	$1.5U_{dc}$	$3U_{dc}$	$4.5U_{dc}$	$6U_{dc}$	$7.5U_{dc}$	$9U_{dc}$
1	1	−1	0	1	−1	0
2	0	1	1	1	−1	−1
3	0	0	0	0	1	1

5　仿真分析

为了验证上述方案的合理性,应用仿真软件 Matlab 进行了仿真。图 3 是阻性负载时的相、线电压(u_A、u_{AB}、u_{CA})仿真波形,负载为 50 kΩ。从仿真波形可以看出,相电压 1 个周期中含有 13 个阶梯,符合前面理论推导的仿真规律;结构中未加功率器件缓冲电路和输出滤波电路,相、线电压波形还是比较平滑,波形质量较好。

图 4 是 50 kΩ 负载时相电流波形,图 5 是各单元和合成波仿真波形,从图中可以清晰看到 3 个单元输出情况和合成波生成过程,并且与图 2 的理论波形相符合。

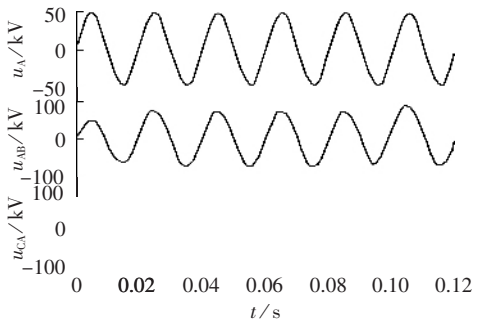

图3 相、线电压仿真波形

Fig.3 Simulation waves of phase and line voltages

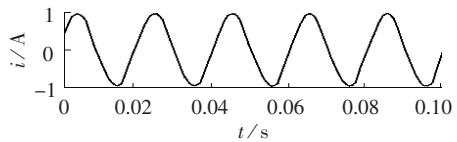

图4 相电流仿真波形

Fig.4 Simulation waves of phase current

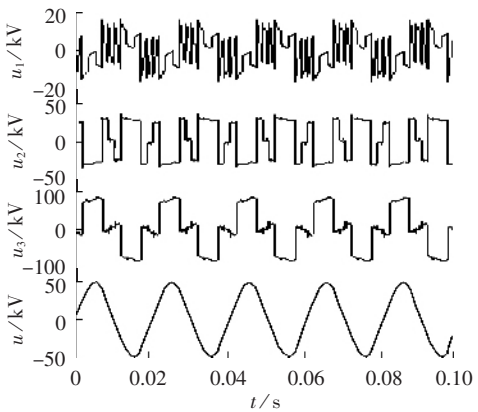

图5 逆变单元和合成波仿真波形

Fig.5 Simulation waves of inverter units and their complex wave

由仿真图可见,这种多重化逆变器输出电平数目多,谐波含量低,波形质量很好。如果 n 取更大的值($n\leqslant 13$),阶梯波电平数就更多,波形质量就会更好。如果在功率较大或波形质量要求更高的场合,可选取更大的 n 值或选用更多组的逆变单元和变压器。

6 结论

采用逆推的方法确定各单元触发脉冲,通过多重移相叠加原理得到谐波含量较低的正弦波输出,能够应用较少的功率器件和较少的功率单元得到电平数较多的合成波,输出波形更加逼近正弦波,谐波含量小。进行了仿真分析,验证设计的合理性,为多重化逆变器的开发利用进行了一项有益的探索。

参考文献:

[1] LAI J S,PENG F Z. Multilevel Converters — a new breed of power converters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996,32(3):509-517.

[2] TOLBERT L M,PENG F Z,CUNNYNGHAM T. Charge balance control schemes for cascade multilevel converter in hybrid electric vehicles [J]. IEEE Trans on Indus,Electron,2002,49(5): 1059-1064.

[3] 薄保中,苏彦民,马学亮. 多电平最优空间矢量控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(2):89-92.
BO Bao-zhong,SU Yan-min,MA Xue-liang. Investigation on multilevel optimal space vector PWM control technique[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(2):89-92.

[4] LEE C K,RON HUI S Y,HENRY Shu-hung chung. A 31-level cascade inverter for power applications[J]. IEEE Trans on Indus, Electron,2002,49(3):613-617.

[5] LAI J S. A novel resonant snubber based soft-switching inverter [J]. IEEE APEC,1995,14(3):797-803.

[6] FUJITA H,WATANABE Y,AKAGI H. Transient analysis of a unified power flow controller and its application to design of the DC-link capacitor[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001,16(5):735-740.

[7] TOLBERT L M,PENG F Z,HABETLER T G. Multilevel converters for large electric drives[J]. IEEE Trans Ind Applicaions, 1999,35(1):36-44.

[8] MANJREKAR M D,STEIMER P K,LIPO T A. Hybrid multilevel power conversion system:a competitive solution for high-power applications[J]. IEEE IAS,2000,36(3):834-841.

[9] STEIMER P K,MANJREKAR M D. Practical medium voltage converter topologies for high power applications [C]//Conference Record of the 2001 IEEE Industry Application Conference, Thirty-sixth IAS Annual Meeting. Piscataway,NJ:IEEE,2001: 1723-1730.

[10] RODRIGUEZ J,LAI J S,PENG F Z. Multilevel inverters:a survey of topologies,controls,and applications [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2002,49(4):724-738.

[11] HAN B,BACK S,KIM H,et al. Dynamic characteristic analysis of SSSC based on multibridge inverter[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2002,17(4):623-629.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

索 迹(1972-),男,吉林四平人,助教,硕士,研究方向为电力电子与电力传动(**E-mail**:suoji1996@163.com);

祁春清(1973-),女,辽宁辽阳人,讲师,硕士,研究方向为电力电子与电力传动(**E-mail**:qichunqing@163.com)。

Research on control method of multiunit inverter

SUO Ji,QI Chun-qing

(Suzhou Vocational College,Suzhou 215104,China)

Abstract: The multiunit inverter is composed of several same power units,which makes the modularized design and manufacture easy and the system reliable. The high voltage output is realized by coupling the power units through power transformer for high voltage and high power applications. A new control method of multiunit inverter is described,which determines the triggering pulse for each unit to obtain the sine wave output through multiple-phase shifting superimposition principle. Less power units and devices are needed to generate multilevel sine-like wave with low harmonic contents. The simulation with Matlab verifies its rationality.

Key words: multiunit; power unit; multiple-phase shifting superimposition