

基于多绕组变压器隔离型变换器的链式 STATCOM 研究

刘海波,毛承雄,陆继明,王 丹

(华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了一种新的 STATCOM 主电路拓扑结构,它由 N 个级联的多绕组变压器隔离型变换器构成,每个多绕组变压器隔离型变换器由 1 个多绕组变压器和 M 个变换器构成,每个多绕组变压器的 M 个副边绕组与 M 个变换器相连, $M \times N$ 个变换器公用一个电容。所提结构由于同时避免了单个器件的串联和并联,从而有效地提高了装置的可靠性;采用载波移相的 SPWM 调制策略可同时优化输出电压和输出电流的谐波性能。所采用的多绕组变压器的副边绕组之间不需要错相位,错相位由变换器的控制器完成。给出了一种恒无功运行模式下的解耦控制方案。基于 Matlab/Simulink 的仿真结果证明了所提结构的良好性能和所提控制策略的有效性。

关键词: 多绕组变压器隔离型变换器;级联;相移 SPWM;谐波畸变率;静止无功补偿

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0005-05

0 引言

STATCOM 是 20 世纪 90 年代出现的一种新型静止无功补偿装置,它在解决电力系统的动态电压崩溃和提高电压稳定性方面起到了非常重要的作用^[1-2]。目前,我国的大区电力系统都已进入千万千瓦级装机的容量水平,大负荷中心和远距离送电普遍缺乏大容量快速可控的无功电源对电压的支撑。因此,我国电网的现状使得研制大容量的 STATCOM 日益成为电力工业界关注的焦点和发展趋势。

在目前的电力电子技术水平下和当前世界上已运行的 STATCOM 装置中主要使用 4 种方法提高装置的容量。

a. 变压器多重化技术^[3-4]。变换器由若干个三相桥或者单相桥通过曲折变压器连接而成,各变压器绕组依次错开一定的角度,以期达到消除谐波的效果。它的缺点是曲折变压器的各绕组之间要错相位且耦合关系复杂,对于不同电平多重化方案都要重新设计,必须考虑交流侧变压器的连接方式、不同变换器的移相角度等问题。

b. 单相变换器链式连接技术^[5-8]。由于采用单相桥串联,因此总的电压输出和整个装置的容量可以成倍提高,而且可以通过采用 δ 控制技术^[7]和载波移相控制技术降低总输出电压谐波含量。其缺点主要是串联的单相桥直流侧电压可能不平衡,因此要采取复杂的外围电路和控制方法平衡直流侧电压。

c. 多电平技术^[9-11]。采用多电平技术可以有效地消除输出电压中的谐波,同时提高输出电压的等级

和增加变换器的容量。其缺点是当采用 5 电平以上的电路时,电路结构和控制都较复杂,直流侧电容电压的平衡控制也非常困难。

d. 开关器件串联技术。这是提高装置容量最常用的方法。其主要缺点是串联器件的均压问题,以及由此而带来的可靠性问题。

在现已投入运行的容量较大的实际 STATCOM 装置中几乎都会同时用到器件的串联技术,而多个器件串联工作的可靠性还需要更多的工程实践进一步验证。另外,当装置容量进一步加大时或者电压等级不是非常高时,就会出现单个器件承受的电流水平不能满足装置实际运行的电流要求,这时就要考虑器件的并联以提高电流等级,而器件并联就必须考虑它的均流问题和因此带来的可靠性问题。

针对传统的 STATCOM 装置主电路拓扑存在的问题,现提出一种新的主电路拓扑结构,即以多绕组变压器隔离型变换器为基本单元,每个单元再依次级联而构成的 STATCOM 主电路。这种结构成功避免了单个器件的串联和并联以及电容电压不平衡问题;基于这种结构的 STATCOM,采用载波移相的 SPWM 控制策略可同时优化输出电压和输出电流的谐波性能;所采用的多绕组变压器副边绕组之间不需要错相位,错相位由变换器的控制器完成;具有分相控制能力,可实现不平衡负荷的平衡化补偿^[12-13]。

1 主电路结构分析及其基本原理

1.1 多绕组变压器隔离型变换器结构图及其等效电路
图 1 为多绕组变压器隔离型变换器的结构图。

设多绕组变压器的副边绕组共有 M 个,原边绕组 1 个。在理想情况下,多绕组变压器的原、副边功率关系如式(1)所示,其中 U_1 、 U_2 、 U_M 为相应副边绕

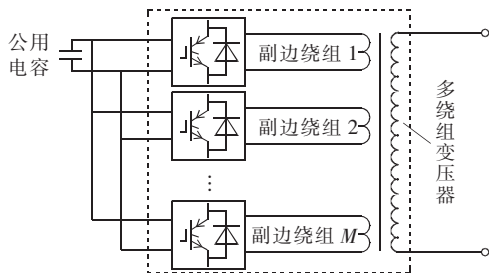


图 1 多绕组变压器隔离型变换器结构图

Fig.1 Block diagram of multi-winding
-transformer-isolated converter

组的电压, I_1 、 I_2 、 I_M 为流过相应绕组的电流, U'_1 为其原边绕组电压, I 为流过原边绕组的电流。

$$U_1 I_1 + U_2 I_2 + \cdots + U_M I_M = U'_1 I \quad (1)$$

当 $U_1 = U_2 = \cdots = U_M$ 且 $U'_1 = K U_1$ 时有式(2)成立。其中, K 为原、副边绕组匝数之比。

$$I = \left(\sum_{i=1}^M I_i \right) / K \quad (2)$$

图 2 为多绕组变压器隔离型变换器的等效电路图。设多绕组变压器副边绕组参数一致且其等效连接电抗和等效电阻分别为 L 和 R 。由图 2 可以看出, M 个变换器是并联关系。

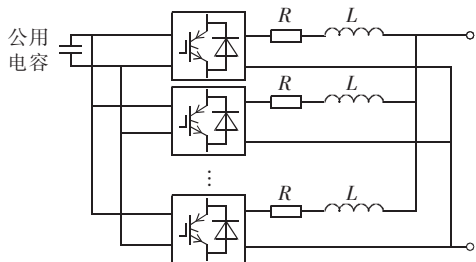


图 2 多绕组变压器隔离型变换器等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of multi-winding
-transformer-isolated converter

由式(1)(2)和图 2 可知,在理想情况下,当 $K=1$, 副边绕组电压相同时, M 个变换器的输出电流之和即为该相 STATCOM 的输出相电流。这样既能成倍增加装置的容量,同时又能减少变换器所用器件承受的电流水平。因此,只要选择合适的 K 和 M 就不会出现单个器件承受的电流水平不能满足装置实际运行的电流要求这个问题,从而可以从根本上避免单个器件的并联及其带来的均流和相关的可靠性问题。

1.2 主电路及基本原理

以多绕组变压器隔离型变换器为基本单元的链式 STATCOM 单相主电路如图 3 所示。其中,多绕组变压器共有 N 个,这 N 个多绕组变压器的原边绕组再依次级联。图 3 中, $N=6$, $M=2$ 。这里,所有与多绕组变压器副边绕组相连的变换器公用一个电容。这种主电路采用多绕组变压器实现了原、副边的电气隔离,变压器原边既可以采用三角形连接也可以采用星形连接,然后通过一个连接电抗或者直接接入系统。多绕组变压器的副边绕组不需要错相位,相对于原边的极性和角度偏移相同,错相位由与多绕组变压器对应的变换器的控制器完成。

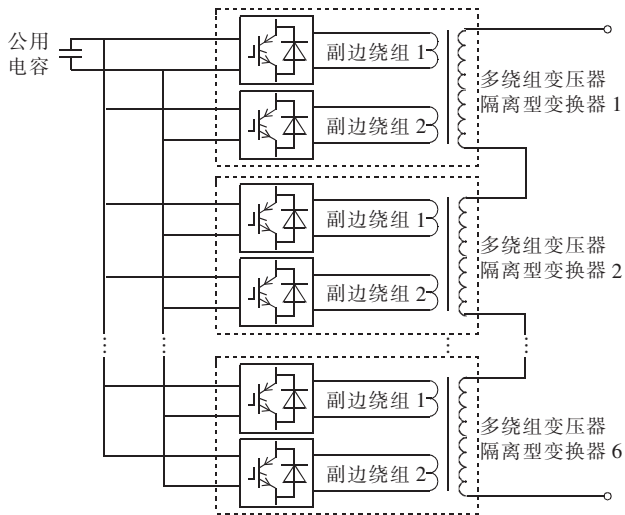


图 3 单相主电路原理图

Fig.3 Principle diagram of single phase main circuit

显然, N 个多绕组变压器依次级联可明显提高装置的耐压水平。由于这种结构可以模块化,因此可以从根本上避免单个器件的串联,也就不必考虑单个器件串联所带来的均压问题和相关可靠性问题。

从上面的分析可知,只要选择合适的 K 、 M 和 N , 利用 $M \times N$ 个变换器,就可达到任何等级装置的要求,同时可以很好地避免单个器件的串并联问题,从而较好地克服了传统 STATCOM 主电路所存在的问题。

1.3 主电路结构分析

根据上述对这种结构的主电路基本原理的分析,可以概括其主要特点如下:

a. 由于采用了隔离变压器,每相各变换器的直流电容可以共用,自然避免了电容电压不平衡问题,不需要专门的控制;

b. 三相电容可以共用,可大幅度减少电容的数量,使得装置的体积和占地面积大为减少,从而降低装置成本;

c. 便于冗余控制,冗余设计可以通过脉冲控制实现,无需电气隔离,简单易行,从而提高了装置的可靠性;

d. 具有分相控制能力,可实现不平衡负荷的平衡化补偿;

e. 多绕组变压器隔离型变换器可采用模块化结构,便于扩展装置容量;

f. 通过选择合适的变比 K 、多绕组变压器的个数 N 以及多绕组变压器的副边绕组的个数 M ,可以适应不同的电压和电流等级;

g. 无需单个器件的串并联,避免了单个器件串联时的均压问题和并联时的均流问题,进一步提高了装置的可靠性;

h. 选择合适的变比 K ,经多绕组变压器降压,自然对每个变换器单元的绝缘要求降低,驱动电源更加可靠,管子成本降低,控制简单化。

当然,这种结构也有局限性。由于采用的多绕组变压器是非标准产品,因而需要专门设计和制造。但是由于它可模块化生产,因而还是具有广阔的市场化应用前景。

2 载波移相 SPWM 调制策略

该主电路结构通过 N 个多绕组变压器隔离型变换器的级联实现高压大容量化,通过与每个多绕组变压器的副边绕组相连的 M 个变换器的并联实现大电流大容量化。这里,所有多绕组变压器的副边绕组不需要错相位,错相位由与所有副边绕组相连的 $M \times N$ 个变换器的控制器完成,相位依次错开 $180^\circ/(M \times N)$ 角度。这可以通过采用基于载波移相的 SPWM 调制策略控制变换器的驱动脉冲来实现。

基于载波移相的 SPWM 通过将载波均匀平移一定的相位来对多电平变换器进行调制,它能够在较低的器件开关频率下获得较高的等效开关频率。目前,根据载波移相角度计算方法的不同,实际应用的调制策略主要有移相 $180^\circ/B$ 和移相 $360^\circ/B$ (B 为移相数目) 2 种方式。文献[14]从谐波分析的角度得出,基于载波移相的 SPWM 调制策略采用 $180^\circ/B$ 移相的调制方法谐波含量较低,分布频段较高,比较适合工程应用。文中的仿真研究均采用 $180^\circ/B$ 移相的调制方法,这里, $B=M \times N$, 因此 $M \times N$ 个变换器的控制器的载波相位依次错开 $180^\circ/(M \times N)$ 角度。

考虑到尽可能减少大容量设备的有功损耗,开关频率的选择不宜太高,下面的仿真试验以 500 Hz 为例,调制比为 0.95, $K=1$, $M=2$, $N=6$, 每个多绕组变压器的额定容量设为 10 MW, 额定电压设为 3.5 kV。

图 4 为多绕组变压器为准理想变压器(绕组电阻设为 0.000 5 p.u., 漏抗设为 0.000 1 p.u.) 时的仿

真波形(图 4(c)中 n 为谐波次数,纵轴 ζ 为各次谐波电压与基波电压的百分比)。由图可见,多绕组变压器的原边电压波形(由于 6 个多绕组变压器原边电压波形除了相位不同外差别不大,这里仅给出了多绕组变压器 1 的波形)每 1/4 周期均有 $M=2$ 级阶梯波,级联后输出电压波形每 1/4 周期均有 $M \times N=2 \times 6=12$ 级阶梯波。经谐波分析后发现,级联后输出电压谐波阶次主要分布在 240 次左右,且总谐波畸变率为 5.18 %。因此,基于这种主电路结构的 STATCOM,采用载波移相的 SPWM 调制策略,可以优化其输出电压的谐波性能。

进一步分析后发现,级联后的输出电压计及到 49 次谐波的电压畸变率为 0.07 %,因为在实际电力系统中系统对高次谐波的阻尼更大,所以,计及到 49 次谐波的电压畸变率在实际中更有意义。而文献[3]中提到的两电平三单相桥四重化、两电平三单相桥八重化、三电平三单相桥四重化、三电平三单相桥八重化、两电平三相桥四重化、两电平三相桥八重化、三电平三相桥四重化、三电平三相桥八重化、9 个变换器级联的链式结构的计及到 49 次谐波的电压畸变率分别为 6.81 %、3.20 %、3.18 %、2.86 %、6.81 %、3.20 %、3.18 %、2.86 %、2.85 %。因此,就达到同等级容量(均为 ± 100 Mvar)条件下的谐波畸变率而言,文中所提的这种结构具有明显的优势。当然,其存在的主要问题是开关损耗偏大,不过仍可控制在合理的范围之内。

由于谐波畸变率很小,所以只需用很小的滤波电感便能得到很好的电流波形。此处所用滤波电感为 0.3 mH,从图 4 可看出,负载电流波形基本上是理想的正弦波。

图 5 为多绕组变压器为非理想变压器(绕组漏抗均设为 0.1 p.u.) 时的仿真波形。

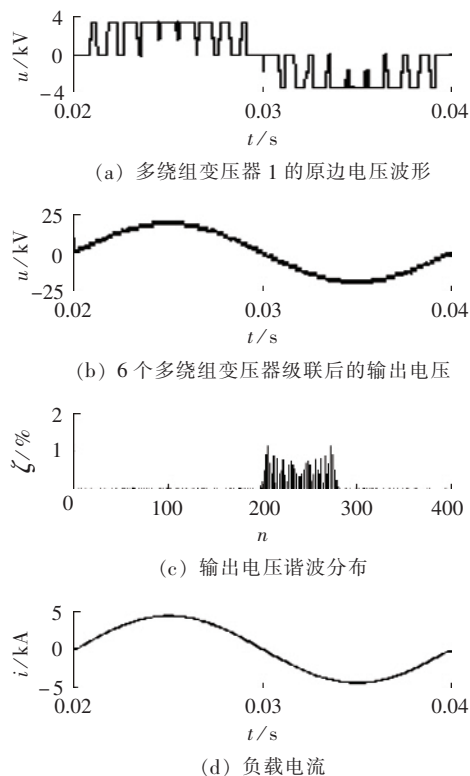
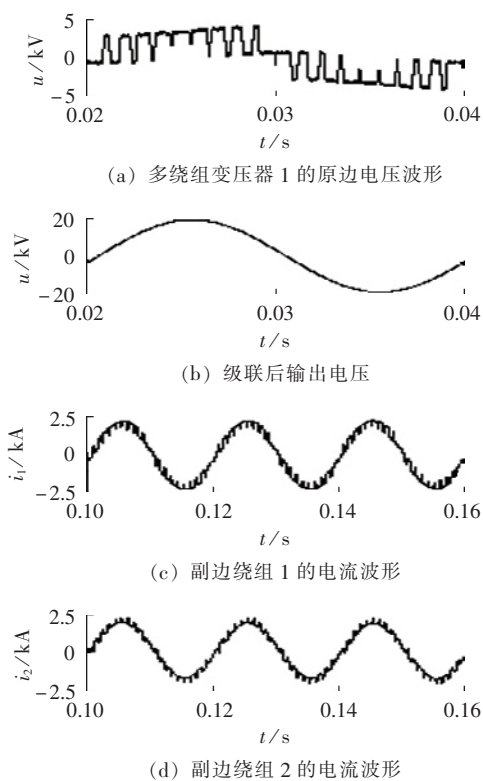
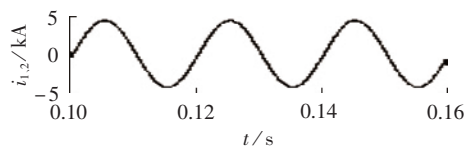


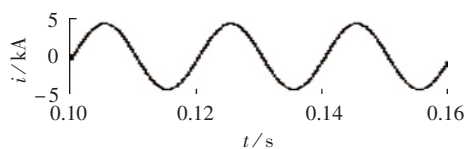
图 4 多绕组变压器为准理想变压器时电压和电流的波形

Fig.4 Voltage and current waveforms when multi-winding transformer is quasi-ideal





(e) 副边绕组 1、2 的电流之和



(f) 负载电流

图 5 多绕组变压器为非理想变压器时电压和电流的波形

Fig.5 Voltage and current waveforms when multi-winding transformer is unideal

经谐波分析后发现,级联后的输出电压谐波畸变率为 0.11%。尽管没有输出滤波电感,但负载电流仍然为很好的正弦波。这说明,通过选择合适的多绕组变压器的短路电压百分数,即使没有滤波电感,只利用绕组漏抗也能得到很好的电压和电流波形。通过比较负载电流波形和副边绕组 1 的电流与副边绕组 2 的电流之和的波形可看出,忽略损耗,负载电流为副边绕组 1、2 的电流之和,这也验证了上文所提的结论。比较负载电流和副边绕组电流的波形可看出,采用载波移相 SPWM 调制策略,使得负载电流波形较之副边绕组电流波形有很大的改善,即优化了负载电流的谐波性能。

3 控制方案

为了消除输出无功功率和直流侧电容电压的相互耦合,基于文献[15]所提变换器数学模型,在此给出了一种解耦控制方案。其控制目标是,在维持输出无功功率恒定的同时,维持装置直流侧电容电压恒定。图 6 所示为所提控制方案的控制框图。

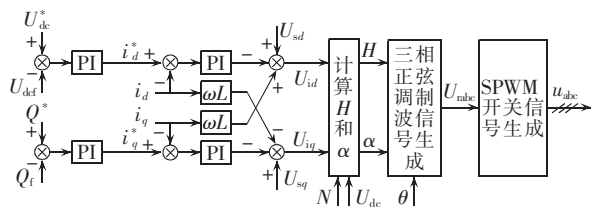


图 6 STATCOM 解耦控制框图

Fig.6 Decoupling control of STATCOM

为了使系统在具备良好的稳态性能的基础上,同时能有效抑制干扰和参数漂移,这里采用了解耦控制,同时引入了状态反馈和电压前馈补偿来简化控制方案的设计。经过状态反馈解耦和电压前馈补偿后, d 、 q 轴系统可当作相互独立的系统处理,输入电压的扰动也被有效地消除了,各轴都可以当作一个独立的二阶系统配置调节器参数。其中, U_{dc} 为直流电容电压; Q 为输出无功功率; i_d 、 i_q 分别为输出电流的有功分量和无功分量; U_{sd} 、 U_{sq} 为与系统连接的节点电压的有功分量和无功分量; U_{id} 、 U_{iq} 为变换器输出电压的有功分量和无功分量; N 为多绕组变压器

的个数,这里 $N=6$; θ 为对称三相正弦调制波的相位; H 为调制比; δ 为变换器输出电压与节点电压的相位差; α 为正弦调制波相位。计算公式如式(3)~(5)所示。

$$H = \sqrt{U_{id}^2 + U_{iq}^2} / (NU_{dc}) \quad (3)$$

$$\delta = U_{iq} / U_{id} \quad (4)$$

$$\alpha = \delta + \theta \quad (5)$$

4 仿真结果

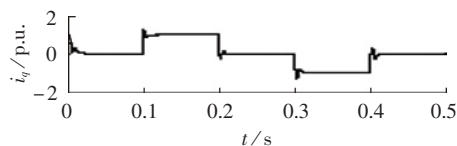
为了验证上述提出的以多绕组变压器隔离型变换器为基本单元的链式 STATCOM 及其控制方案的可行性,在 Matlab 时域环境下利用 Simulink 工具进行了实例仿真分析。图 7 为主电路结构图,其中, L 为连接电感, C 为三相公用电容,多绕组变压器的原边与系统连接采用三角形连接方式。



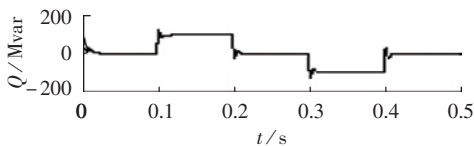
图 7 STATCOM 主电路结构框图

Fig.7 Block diagram of STATCOM main circuit

仿真参数如下:电网线电压有效值为 13.8 kV,频率 $f=50$ Hz,无功功率设为 100 Mvar,载波频率 $f_c=500$ Hz,电容 $C=5000 \mu\text{F}$,直流电容电压 $U_{dc}=2.5$ kV,每个多绕组变压器的漏抗设为 0.1 p.u.,连接电感为 $1 \mu\text{H}$ 。图 8 给出了恒无功运行模式下的仿真结果。仿真中 STATCOM 输出无功从 0 跳变至 +100 Mvar,从 100 Mvar 跳变至 0,从 0 跳变至 -100 Mvar,再跳回到 0。



(a) 无功电流



(b) 无功阶跃响应

图 8 STATCOM 仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms of STATCOM

从图 8 中可以看到,系统的阶跃响应非常快捷,响应时间不到 20 ms。

5 结论

提出了一种新的 STATCOM 主电路拓扑,对其主电路结构和基本原理进行了详细分析,并用 Matlab 对载波移相 SPWM 调制策略及系统控制方案进行了仿真分析。结果表明:基于这种结构的 STATCOM,采用载波移相的 SPWM 调制策略可同时优化输出电压和输出电流的谐波性能;且系统的阶跃响应非常快

捷。所提结构的容量在理论上可做到很大,不受电压和电流等级的限制,并且避免了单个器件的串联和并联,从而大幅提高了装置的可靠性。

参考文献:

- [1] 栗春,马晓军,姜齐荣,等. 用 STATCOM 改善系统电压调节特性的动模实验[J]. 中国电机工程学报,1999,19(9):46-49.
LI Chun,MA Xiao-jun,JIANG Qi-rong,et al. The experimental research on STATCOM to mitigate the voltage sag under load disturbance[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(9):46-49.
- [2] 栗春,马晓军,姜齐荣,等. STATCOM 提高系统暂态稳定及阻尼的动模实验研究[J]. 中国电机工程学报,1999,19(12):36-40.
LI Chun,MA Xiao-jun,JIANG Qi-rong,et al. Transient stability enhancement and damping improvement by STATCOM physical experimental study[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(12):36-40.
- [3] 沈斐,王娅岚,刘文华,等. 大容量 STATCOM 主电路结构的分析和比较[J]. 电力系统自动化,2003,27(8):59-65.
SHEN Fei,WANG Ya-lan,LIU Wen-hua,et al. Analysis and comparison of large capacity STATCOM circuit configuration[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(8):59-65.
- [4] YU Qing-guang,LI Pei,LIU Wen-hua,et al. Overview of STATCOM technologies[C]//IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation,Restructuring and Power Technologies,2004. Hong Kong,China:[s.n.],2004:647-652.
- [5] LIANG Yi-qiao,NWANKPA C O. A new type of STATCOM based on cascading voltage-source inverters with phase-shifted unipolar SPWM[J]. IEEE Trans on Industry Applications,1999,35(9):1118-1123.
- [6] PENG Fang-zheng,LAI Jih-sheng. Dynamic performance and control of a static var generator using cascade multilevel inverters[J]. IEEE Trans on Industry Applications,1997,33(3):748-755.
- [7] PENG Fang-zheng,WANG Jin. A universal STATCOM with delta-connected cascade multilevel inverter[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference,2004. Aachen,Germany:[s.n.],2004:3529-3533.
- [8] 魏文辉,刘文华,宋强,等. 基于逆系统方法有功-无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):23-28.
WEI Wen-hui,LIU Wen-hua,SONG Qiang,et al. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(3):23-28.
- [9] 徐政,韩祯祥,田杰,等. 三电平静止同步补偿器的运行原理研究[J]. 电力系统自动化,1999,23(7):28-33.
XU Zheng,HAN Zhen-xiang,TIAN Jie,et al. Analysis of the three-level STATCOM operation principle[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(7):28-33.
- [10] SHARMEELA C,UMA G,MOHAN M R,et al. Multi-level distribution STATCOM for reducing the effect of voltage sag and swell[C]//International Conference on Power System POWERCON 2004. Singapore:[s.n.],2004:306-310.
- [11] EKANAYAKE J B,JENKINS N. Selection of passive elements for a three-level inverter based static synchronous compensator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(2):655-661.
- [12] 朱永强,刘文华,邱东刚,等. 基于单相 STATCOM 的不平衡负荷平衡化补偿的仿真研究[J]. 电网技术,2003,27(8):42-45.
ZHU Yong-qiang,LIU Wen-hua,QIU Dong-gang,et al. Simulation of balancing compensation of unbalanced load based on single phase STATCOM[J]. Power System Technology,2003,27(8):42-45.
- [13] 朱永强,刘文华,宋强,等. D-STATCOM 不平衡负荷补偿电流的优化设计[J]. 电力系统自动化,2005,29(8):65-70.
ZHU Yong-qiang,LIU Wen-hua,SONG Qiang,et al. Optional design of compensation currents for D-STATCOM used for unbalanced load[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(8):65-70.
- [14] 姜旭,肖湘尹,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):57-59.
JIANG Xu,XIAO Xiang-ning,YIN Zhong-dong,et al. Harmonic analysis for cascade multilevel converter based on carrier-shifted SPWM[J]. Power Electronics,2005,39(5):57-59.
- [15] 陈坚. 电力电子学——电力电子变换和控制技术[M]. 北京:高等教育出版社,2002.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

刘海波(1976-),男,湖北武穴人,博士研究生,研究方向为大功率电力电子技术在电力系统中的应用 (E-mail: liucaifan@yahoo.com.cn);

毛承雄(1964-),男,湖北武穴人,教授,博士研究生导师,研究方向为大型同步发电机最佳励磁控制、大功率电力电子技术在电力系统中的应用以及电力系统动态仿真方面的研究;

陆继明(1956-),男,江苏南通人,教授,研究方向为电力系统运行与控制;

王丹(1977-),男,江西瑞昌人,博士,研究方向为发电机励磁控制及电力电子技术在电力系统中的应用。

Research of STATCOM based on multi-winding-transformer-isolated converter

LIU Hai-bo,MAO Cheng-xiong,LU Ji-ming,WANG Dan

(Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: A main circuit topology of STATCOM(STATic synchronous COMPensator) is presented, which has N cascaded multi-winding-transformer-isolated converters. Each converter consists of one multi-winding transformer and M converters. Each multi-winding transformer has M secondary windings connecting with M converters separately. $M \times N$ converters share one capacitor. The proposed topology avoids both serial and parallel connection of devices,which improves device reliability effectively. The phase-shifted SPWM is used to decrease the harmonics in both output voltage and output current. The secondary windings of multi-winding transformer are not phase-staggered,which is accomplished by the controller of converter. A decoupling control scheme under constant reactive power operation mode is also proposed. Simulations with Matlab/Simulink verify the performance of proposed topology and the effectiveness of proposed control scheme.

This project is supported by Program for New Century Excellent Talents in University(NCET-04-0710).

Key words: multi-winding-transformer-isolated converter; cascade; phase-shifted SPWM; harmonic distortion factor; static synchronous compensator