

单绕组变压器隔离型多重化SVG装置研制及应用

谭胜武, 刘华东

(株洲变流技术国家工程研究中心有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 设计了一套基于单绕组变压器隔离型多重化结构的静止无功发生器(Static Var Generator, SVG)系统, 讨论了其多重化结构的主电路设计, 同时介绍了双闭环控制以及多重化载波移相正弦脉宽调制技术。试验和实际工程应用表明, 该装置系统设计合理、可移植性强、补偿速度快、控制精度高、输出谐波含量低, 完全满足工程化应用的要求。

关键词: 多重化; SVG; 双闭环控制; 载波移相; 正弦脉宽调制; 工程应用

中图分类号: TM714.3

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)02-0056-05

Development of Multiple SVG Device Isolated by Single-winding Transformer and Its Application

TAN Sheng-wu, LIU Hua-dong

(Zhuzhou National Engineering Research Center of Converters Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Multiple SVG isolated by single-winding transformer is presented in this paper. The main circuit of the system and the double closed-loop control are discussed. The multiple carrier phase shift sine pulse width modulation technology is illustrated. Test and engineering application show that this device is of rational design and with high degree of portability, fast compensation speed, high control accuracy, low harmonic content, fully satisfied the requirements in application.

Key words: multiple-branch structure; SVG; double closed-loop control; carrier phase shift; sine pulse width modulation; engineering application

0 引言

大容量无功设备导致电网功率因数降低, 同时降低了电能生产、传输和利用的效率, 甚至影响到负载的正常工作。静止无功发生器(Static Var Generator, SVG, 也称为STATCOM)作为一种较理想的无功补偿和谐波抑制设备, 得到了越来越深入地研究和广泛地应用^[1-5]。SVG装置主电路设计有3种: 基于单绕组变压器的变流器多重化结构、基于多绕组变压器的变流器多重化结构、基于H桥级联的链式结构。链式SVG由于需要多个

H桥模块级联, 价格较高, 尤其在容量不大的场合也没有成本优势。基于多绕组变压器结构的多重化SVG虽然控制算法上比单绕组多重化SVG相对简单, 但是变压器成本明显要比单绕组多重化SVG高。因此, 本文设计了一套单绕组变压器隔离型多重化SVG。该系统设计合理, 具有运行稳定、无功控制精度高、响应速度快、谐波抑制能力强等特点, 满足应用工程实际要求。

1 主电路设计

由文献[6]可知, SVG是通过连接电抗器并联到电网的, 其控制系统通过控制逆变器输出的交流电压幅值和相位, 就能控制SVG发出的无功功率的大小和方向, 从而实现动态无功补偿的目的。连接电抗器除了能够

收稿日期: 2013-02-01

作者简介: 谭胜武(1979-), 男, 工程师, 主要从事电能质量治理方面工作。

将变流器与交流母线这两个电压不等的电源相连接,同时,还可以抑制SVG补偿装置发出电流的高次谐波。单重SVG并入电网的示意图如图1所示,其中 L_A, L_B, L_C 为连接电网和变流器的电抗器, $T_1 \sim T_6$ 为变流器IGBT模块, C_d 为直流侧电容。

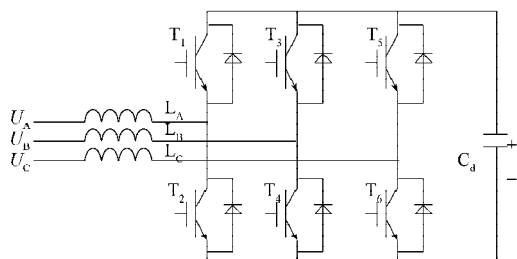


图1 三相 SVG 并入电网的拓扑图

Fig.1 Topology of 3-phase SVG connected to the distribution network

所谓单绕组变压器隔离型多重化SVG,就是通过隔离变压器将SVG变流器从高压侧和低压侧隔离开,SVG变流器连接于隔离变压器低压侧同一个绕组上。根据SVG容量的大小,可以选择不同的SVG支路数目。

该拓扑结构具有以下特点:

(1) 每重SVG都使用独立的变流器单元,与共用直流电容的拓扑结构相比,在每重SVG变流器之间无环流;

(2) 每重SVG易于集中控制且不会产生相互干扰补偿的问题;

(3) 每重SVG可以实现模块化设计,方便移植,并可根据容量大小扩充模块个数;

(4) 可以冗余降额运行,一个变流器出现故障,不会造成全部停机;

(5) 可以与可投切电容器组配合补偿,使有源补偿容量减少,从而降低装置整体成本。

本文设计的方案是在三相10 kV母线进行综合补偿,主电路由SVG支路、隔离变压器和3组高压电容组(High Voltage Capacitors, HVC)支路构成,如图2所示。

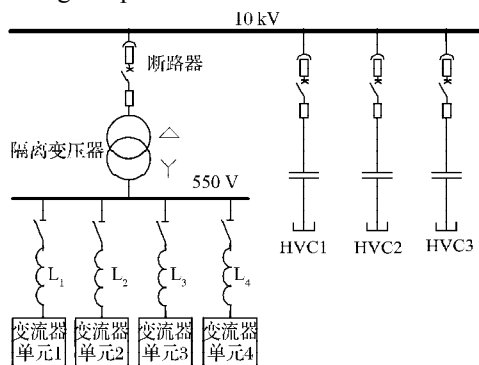


图2 系统主电路图

Fig.2 Diagram of system main circuit

SVG补偿容量为 $\pm 3\,000$ kvar, HVC1支路补偿容量为1 000 kvar, 设为5次滤波支路; HVC2支路补偿容量为1 000 kvar, 设为7次滤波支路; HVC3支路补偿容量为1 000 kvar, 设为11次滤波支路。整套补偿装置可发出-6 000 kvar~+3 000 kvar的无功,根据负荷无功情况进行自动补偿。

SVG主电路隔离变压器选用Dyn11接法,二次侧额定电压550 V,二次侧并联4个相互独立的变流器,每个变流器额定无功容量800 kvar。

2 控制系统的设计

控制系统设计的基本思路是所有变流器共用一个控制器,控制器通过对10 kV电网电压和电网电流信号的采集,使用无功电流提取算法实时计算出SVG应补偿的无功电流,平均分配给各个变流器单元运算模块,各运算单元将此无功电流值作为各变流器单元的无功电流指令值;然后分别通过电流闭环反馈控制、直流侧电压闭环控制使SVG各变流器单元实际输出的无功电流实时跟踪无功电流指令值,从而达到无功功率实时补偿目的,提高电网的功率因数。下面重点介绍双闭环控制 and 多重化载波移相技术。

2.1 双闭环控制

SVG接入配电系统中的示意图如图3所示。图中,电源电压为 U_{abc} ,输电线路阻抗为 $R_s + j\omega L_s$; $U_{pcc(abc)}$ 为电网公共点Pcc上的电压; i_{abc} 为电源总电流;负载为 $R_L + j\omega L_L$ 。SVG包括隔离变压器、连接电抗器 L_f 、变流器T、直流电容 C_d 和控制器。控制器采集电网电压 $U_{pcc(abc)}$ 、变流器电流 $i_{c(abc)}$ 和直流侧电压 U_d ,调节出脉冲P来控制变流器T发出的电压 U_T 的幅值和相角,以补偿配电系统的无功功率。

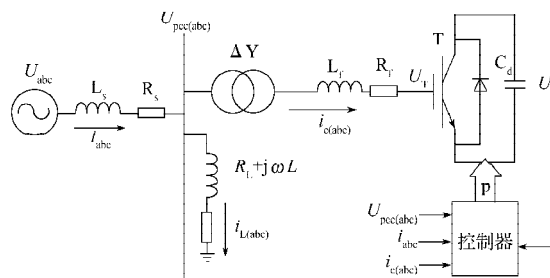


图3 SVG在配电系统中的示意图

Fig.3 Diagram of SVG in the distribution network

为了精确地补偿配电网系统中的无功功率,本文采用的SVG采用双闭环的控制策略,如图4所示。双闭环采用无功功率、直流电压外环和电流内环结构。

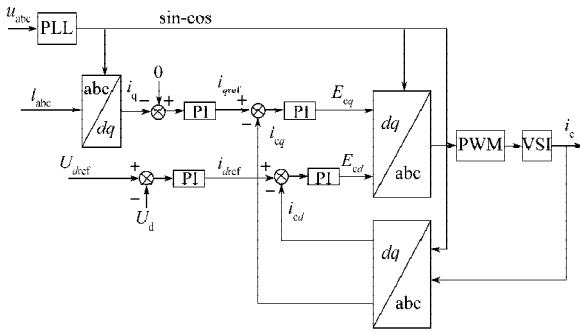


图4 SVG 双闭环控制

Fig.4 SVG double closed-loop control

从图4可看出,配电网的总电流 $i_{s(abc)}$ 经过 dq 分解出系统的无功电流 i_q , i_q 与目标无功电流(假设为0)的差值经过PI调节器调节出SVG系统所需的无功电流 i_{qref} ,构成无功功率外环,用于补偿配电系统的无功功率;变流器直流侧目标电压 U_{dref} 与实际直流电压 U_d 的差值通过PI调节器,调节出SVG系统所需的有功电流 i_{dref} ,构成直流电压外环,用于稳定变流器的直流电压。

无功功率外环调节出的目标无功电流指令 i_{qref} 与SVG实际输出无功电流 i_{cq} 通过PI调节器,构成无功电流内环;直流电压环调节出的目标有功电流指令 i_{dref} 与SVG实际输出有功电流 i_{cd} 通过PI调节器,构成有功电流内环。这样,无功电流内环和有功电流内环分别调节出变流器在 dq 坐标系下的电压指令 U_d , U_q 。 U_d , U_q 通过 dq - abc 坐标变换后,得到变流器所需的电压调制波。

2.2 多重化载波移相技术

控制系统首先通过双闭环控制计算出所需要的电压调制波,与三角波比较后得到PWM脉冲驱动变流器,以控制发出电压 U_i 的幅值和相位。在多重化SVG的控制过程中,引入了多重化载波移相技术(CPS-SPWM)。

载波移相正弦脉宽调制技术是一种适用于基于全控器件(如IGBT等)的开关调制策略,非常适合基于单绕组变压器隔离型多重化的SVG主电路拓扑。载波移相正弦脉宽调制技术的基本思想是:假设多重化SVG并联的变流器重数为 N ,SVG的每重三相桥变流单元共一个调制波信号 $u_s(\omega_s t)$,角频率为 ω_s ,其中每重SVG的三相桥变流器单元的三角载波频率为 $K_c \omega_s$,将SVG三相桥变流器单元的三角载波的相位互相错开三角载波周期的 $1/N$,则第 $M(1 \leq M \leq N)$ 个三相桥变流器单元的三角载波的初相角 $\varphi_L = \varphi_c + 2\pi L/N$,将 N 重SVG三相桥变流器单元的输出电流叠加,那么多重化SVG变流器总的输出电流的等效开关频率为 $NK_c \omega_s$ [7-11]。

多重化载波移相SPWM的控制步骤如下:

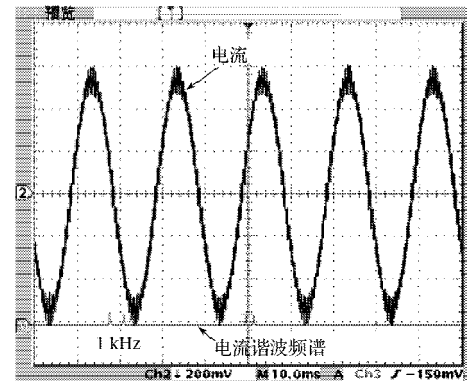
(1) SVG启动时,每条支路以固定载波比较的PWM脉冲逐次启动。所有投入完成后,检测正常运行的支路数,假如正常运行的支路数为 K ,则调整各重载波相位相差 $360^\circ/K$;

(2) 运行过程中,假设当前运行支路数为 K ,若某条支路出现故障,控制系统将其退出运行,自动隔离故障支路,并将各重相位错开 $360^\circ/(K-1)$,如再有支路因故障退出运行,以此类推,相位将错开 $360^\circ/(K-2)$;

(3) 运行过程中,假设当前运行支路数为 K ,如果因故障而隔离的支路经过检修后,恢复正常时,控制系统将自动启动该条支路,并将各重相位错开 $360^\circ/(K+1)$ 。

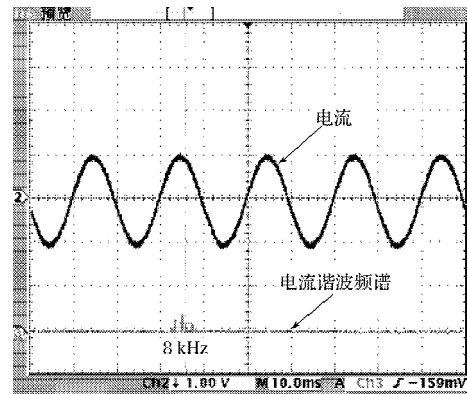
3 试验结果

由于各重SVG支路的开关频率为2 kHz,2重并联时等效开关频率为4 kHz,3重并联时等效开关频率为6 kHz,4重并联时等效开关频率为8 kHz。因此,随着并联重数越来越多,系统的等效开关频率越高。单重SVG与四重化SVG输出电流的对比如图5所示。



(a) 单重 SVG 运行时电流波形

(a) Current waveform while single SVG branch is running



(b) 4重运行时电流波形

(b) Current waveform while four SVG branches are running

图5 不同重数 SVG 运行电流波形

Fig.5 Current waveform with different SVG branches

从图5波形可以看出,随着并联的重数增加、等效

开关频率的提高,特征次谐波也越来越高(由1重特征谐波1 kHz附近提高到4重特征谐波的8 kHz附近),波形也越来越趋于正弦化。

为了验证本文的控制系统设计和SVG快速跟踪负载补偿的能力,进行了自动跟踪补偿试验。通过频繁启停电动机等负荷来模拟快速变化的负载,如图6所示。当检测到电动机负载变化时,SVG控制系统计算出电流指令和调制波,改变逆变器输出电压,从而改变SVG发出的补偿电流,抑制负载快速变化引起的无功波动和电压波动。

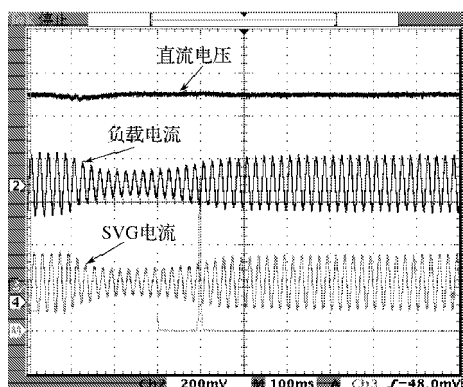


图6 自动跟踪负载快速变化过程

Fig.6 Process of automatic tracing the rapid load variation

可见,本文的控制策略能够使SVG运行稳定,并能快速地响应负荷的变化。

同时,试验还在投入和切除HVC固定补偿支路时的过渡过程中进行测试。SVG在投入和切除HVC时的波形如图7所示。在HVC投入前,试验线路中存在一定的负载,所以SVG在HVC投入之前或HVC切除之后,SVG有一定的补偿电流。

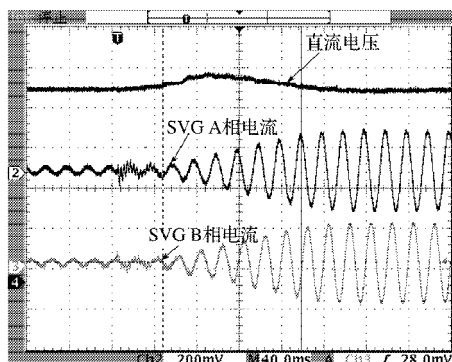


图7 HVC支路投入过渡过程

Fig.7 Process of HVC branch is connecting to the distribution network

从图7可以看出,当HVC投入后,SVG能够迅速的补偿HVC的容性无功,补偿电流增大,当HVC切除之后,SVG的补偿电流迅速减少,仅仅补偿线路中的其它负载,所以SVG能够快速抑制HVC投切引起的扰动。

4 现场运行效果

陕煤集团某煤矿变电所由两段母线供电,两个变压器容量分别为40 MVA。主要负载为矿井提升机、皮带机、抽风机等。各种电机频繁启动,电压和无功波动大,谐波含量高,功率因数为0.82左右。株洲变流技术国家工程研究中心有限公司为该变电所设计了两套四重化SVG+HVC补偿装置,每段母线各一套。其中HVC滤除系统中的部分低次谐波(5,7,11次);提供部分容性无功,容量为3 000 kvar;提供感性和容性无功,容量为-3 000 kvar~+3 000 kvar。SVG支路的外形图如图8所示,从左至右依次为控制柜、4重SVG支路和隔离变压器。

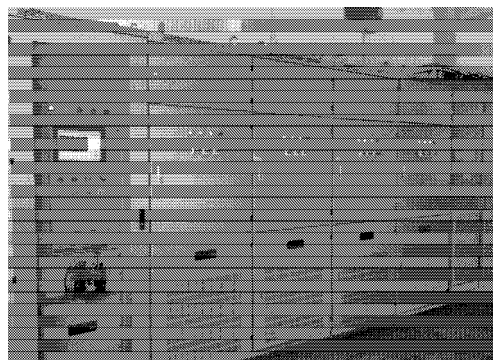


图8 变压器隔离型多重化 SVG

Fig.8 Multiple-branch SVG isolated by single-winding transformer

装置投入运行后,变电所平均功率因数由0.82提高到0.96以上,低次谐波也得到了抑制,5,7,11次谐波均降至国标以内。

5 结语

本文所设计的单绕组变压器隔离型多重化SVG作为一种新型的基于全控器件的无功发生装置,具有模块化设计、无功输出调节范围灵活、补偿速度快、控制精度高等优势。同时,多重化SVG通过载波移相技术,能够使装置达到很高的开关频率,提高了器件的等效开关频率,消除了低次谐波,并使高次谐波向更高频率迁移,从而大大降低了输出电流中的谐波含量。可见,本文所设计的单绕组变压器隔离型多重化SVG是一种新型的绿色环保设备,具有很好的社会经济价值。

参考文献:

- [1] CHEN W L, HSU Y Y. Direct output voltage control of a static synchronous compensator using current sensorless d-q vector based power balancing scheme[C]// 2003 IEEE PES on Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003,2: 545-549.
- [2] 姜齐荣,刘文华,韩英铎,等. ± 20 Mvar STATCOM 控制

- 器设计[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 24-28.
- [3] 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.
- [4] Sensarma P S, Padiyar K R, Ramanarayanan V. Analysis and performance evaluation of a distribution STATCOM for compensating voltage fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 259-264.
- [5] 耿俊成, 刘文华, 俞旭峰, 等. 链式 STATCOM 的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 66-70.
- [6] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [7] 王立乔, 王长永, 黄玉水, 等. 基于相移 SPWM 技术的级联型多电平变流器[J]. 高压技术, 2002, 28(7): 17-18, 21.
- [8] 周京华, 杨振, 苏彦民. 级联型大功率逆变电源数字化实验系统的研制[J]. 电力电子技术, 2004, 38(5): 1-3, 12.
- [9] 周京华, 苏彦民, 詹雄. 多单元串联多电平逆变电源的控制方法研究[J]. 电力电子技术, 2003, 37(4): 49-51.
- [10] 李建林. 载波相移级联 H 桥型多电平变流器及其在有源电力滤波器中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [11] 王长永. 组合变流器相移 SPWM 技术及其在有源电力滤波器中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.

(上接第 55 页)

4 结语

长期以来, 电动轮自卸车的电传动控制装置一直依赖进口, 存在检修麻烦、备件昂贵及订购周期长等缺点。该励磁控制系统的研制, 对开展电动轮自卸车电传动控制系统的相关科研试验、最终提高电动轮自卸车的国产化水平和降低对国外产品的依赖程度具有重要意义。该产品已应用于 220 t 矿山电动轮车并通过了主

机厂的试验考核。

参考文献:

- [1] 刘妍. 基于高频旋转变换器数字无刷励磁的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010: 3-6.
- [2] 李兆营. 混合励磁无刷交流同步电机励磁变换器的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010: 8-11.
- [3] 邵伟, 凌丹. 基于智能积分的改进增量式 PID 算法[J]. 机电工程技术, 2010, 39(11): 46-47.

《大功率变流技术》参考文献著录格式

参照国标 GB/T 7714-2005《文后参考文献著录规则》, 结合本刊来稿情况, 编者总结了以下 10 种文后参考文献的著录格式, 供作者参考。

(1) 图书

作者^①. 书名[M]. 出版社所在城市: 出版社名称, 出版年: 引文起止页码.

(2) 期刊中论文

作者^①. 论文标题[J]. 所登载期刊名称, 年, 期刊卷次(期次): 引文页码.

(3) 专利

专利申请者或所有者^①. 专利题名: 专利国别, 专利号[P]. 公开或公告日期[引用日期]. 获取和访问路径.

(4) 标准(包括法律、法规及政府文件)

标准提出(起草)者^①. 标准号 标准名称[S]. 出版社所在城市: 出版社名称, 出版年.

(5) 学位论文

作者^①. 论文题名[D]. 出版社所在城市: 出版社名称, 出版年(未正式出版的学位论文可按“保存地: 保存单位, 保存年”的顺序著录): 引文页码.

(6) 会议论文集中论文

作者^①. 论文题名[C]//论文集的编者. 论文集题名, 出版社所在城市: 出版社名称, 出版年: 引文页码.

(7) 科技报告

报告人^①或单位. 报告题名[R]. 报告印刷单位所在城市: 报告印刷单位名称, 印刷年份.

(8) 使用手册及说明书

撰写人^①或单位. 题名[M]. 印刷单位所在城市: 印刷单位名称, 印刷年份.

(9) 报纸中文章

作者^①. 文章题名[N]. 报纸名称, 出版年-月-日(版次).

(10) 电子文献(包括上述各类文献的电子版)

作者^①. 文献题名[文献类型标志代码^②/电子文献载体类型标志代码^③]. 出版地: 出版社名称, 出版年(更新或修改日期)[引用日期]. 文献访问路径.

注:

①对多作者情况, 只写前三位作者姓名, 以“等”结束; 对用字母表示作者姓名情况, 外文作者姓名一律采用“姓前名后”格式, 姓为全拼、名为缩写且无缩写点, 但用拼音表示的中文作者名则为全拼。

②文献类型标志代码包括: M(普通图书)、C(会议录)、G(汇编)、N(报纸)、J(期刊)、D(学位论文)、R(报告)、S(标准)、P(专利)、DB(数据库)、CP(计算机程序)及 EB(电子公告)。

③电子文献载体类型标志代码包括: MT(磁带)、DK(磁盘)、CD(光盘)及 OL(联机网络)。