

一种星接链式 STATCOM 不平衡补偿的新拓扑

赵香花¹, 陈远华², 刘文华¹, 张秀娟², 李刚²

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

2. 思源电气股份有限公司, 上海 201108)

摘要: 针对传统星接链式 STATCOM 较难实现不平衡补偿的问题, 提出了一种星接链式 STATCOM 实现不平衡补偿功能的新拓扑结构, 即增加一台接地变压器, 将 STATCOM 和接地变压器的中点相连, 实现负序补偿所需的零序电流通路。通过功率分析, 分析了这种新拓扑结构下参考电流和零序电流生成方法, 并推导了该结构下相间直流电压平衡的控制方法。仿真波形和整机实验数据表明, 采用所提结构和控制方法后, 负荷中的负序电流得到了较好的补偿, 相间直流电压平衡的效果较好。工程分析表明, 所提方法与增加 Δ/Y 连接变压器实现不平衡补偿的方式相比, 在成本和占地上都有较大优势。

关键词: 星接链式 STATCOM; 接地变压器; 补偿; 电压控制; 拓扑

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.019

0 引言

链式静止同步补偿器(STATCOM)作为一种新型的动态无功补偿电力电子装置, 在风电场、冶金、石化和电力系统等行业中得到了广泛应用。链式 STATCOM 采用 H 桥级联的方式, 开关频率低, 谐波特性好, 适合高压大容量补偿, 可以按控制要求迅速向电网注入连续的容性或感性无功, 从而起到调节功率因数和稳定电网电压的作用^[1-6]。

链式 STATCOM 的主电路有 2 种连接方式: 星接方式和角接方式。角接方式可以实现不平衡补偿功能^[7-13], 但在相同的电压等级下, 与星接相比需要级联的模块较多, 控制复杂度较高; 星接方式的功率模块数量少, 控制简单, 可靠性好, 因此在实际工程中最常用。星接 STATCOM 在接入三相四线系统时, 可以补偿不平衡负荷^[14], 但我国中压等级一般为中性点不接地系统, 星接 STATCOM 在三相三线系统下输出负序电流时, 会造成三相相间有功不平衡, 从而引起三相直流电压较大差异, 为了消除该相间差异需要加入零序电压控制^[15-17], 该电压的加入会抬高直流电压, 从而降低器件工作电压的裕量, 破坏绝缘水平, 因此星接 STATCOM 在实际工程中较难实现不平衡补偿。

随着用户运行经验的增加以及现场运行条件变化, 在许多已投运的工程中, 用户对 STATCOM 提出了增加不平衡补偿的要求, 比如在风电场中, 当负荷三相不对称时, 要求 STATCOM 能对三相负荷进行分相补偿。有 2 种方式可以解决现场这类问题: 一是

通过增加同规格的功率模块数量将星接改造为角接, 根据线电压和相电压的关系, 需要增加的数量为原有功率模块数量的 73.2%; 二是采用 Δ/Y 变压器连接星接 STATCOM 和电网系统。这 2 种方式都会导致装置成本和施工成本增加, 且增大占地面积, 因此现场一般都较少使用。

本文针对星接链式 STATCOM 较难补偿不平衡电流的缺陷, 提出了一种新的拓扑结构, 即增加一台接地变压器与星接链式 STATCOM 主电路的中性点相连, 形成补偿负序电流所需的零序电流通路, 从而实现不平衡补偿的功能。

1 星接链式 STATCOM 补偿负序的新拓扑

链式 STATCOM 可等效为电压源逆变器, 它通过连接电抗接入电网。STATCOM 整体控制框图如图 1 所示, 首先对系统电压进行相位检测, 得到基波正序电压的同步相位, 根据瞬时无功功率理论, 以该相位为基准对三相负荷电流进行 dq 分解, 得到基波正序电流和负序电流分量^[18-19]; 然后根据补偿要求取出正序无功电流分量和负序电流分量生成参考电流, 并经过瞬时电流跟踪方法得到参考电压; 经载波移相 PWM 方法后输出脉冲信号到主电路功率器件, 从而实现补偿电流的输出。



图 1 链式 STATCOM 控制框图

Fig.1 Block diagram of cascaded STATCOM control

星接链式 STATCOM 仅进行无功补偿时, 上述参考电流仅包含无功分量, 因此一个周期内该相的直流电容上有功率为零; 但进行不平衡补偿时, 参考电流中包含负序分量, 导致输出电流中的负序电流

收稿日期: 2013-01-25; 修回日期: 2013-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077076)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077076)

与各相电压并不垂直,会在各相的直流电压上产生持续的有功注入或输出,由于星接链式 STATCOM 的三相直流电容各自独立,因此会造成相间的直流电压不平衡,使 STATCOM 不能正常工作。

参考角接 STATCOM 补偿负序的控制方式,若存在一种结构使星接 STATCOM 能输出零序电流,则可以通过调节零序电流的幅值和相位,使包含负序的三相参考电流分别垂直于三相系统电压,避免有功波动。根据这个思路,本文提出了增加一台接地变压器的新拓扑结构,连接方式见图 2。

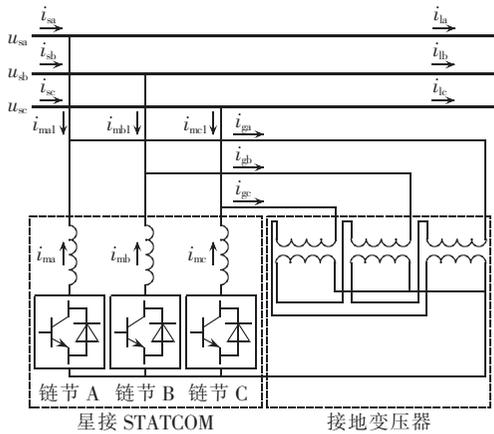


图 2 星接 STATCOM 和接地变压器连接图

Fig.2 Connections between grounding transformer and STATCOM with star configuration

接地变压器常用于为中性点不接地系统构造一个中性点。以 ZNyn11 类型为例,接地变压器高压线圈的接线方式见图 3。它的高压绕组线圈每相分成匝数相等的 2 个部分,分别依次套装在三相铁芯的上下 2 个铁芯柱上,图中所示均为一次绕组,各相第 2 个绕组的首端相连,形成中性点 N。以 a 相为例,当仅有系统正序电压时,接地变压器上的压降 U_{Tm} 等于 U_{11} 和 U_{32} 的差值,该值正好与系统电压相等,中性点对地电压 U_0 为 0,即对正序电压呈现高阻抗;同理仅有负序电压时,中性点电压 U_0 也为 0,即对负序电压也呈现高阻抗;仅有零序电压时, U_{11} 和 U_{32} 互相抵消,接地变压器上压降为 0,中性点电压等于零序电压,即接地变压器对零序电压呈现低阻抗。

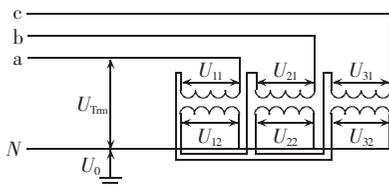


图 3 接地变压器结构图

Fig.3 Structure of grounding transformer

从前面的分析可知,为了补偿负序电流且不造成相间直流电压的不平衡,STATCOM 的输出电流中必

须包含零序电流分量,而星接 STATCOM 三相输出的电流之和必须为 0,其主电路结构无法输出零序电流。由于接地变压器能构造出一个中性点,对零序电压呈低阻抗,因此在这种结构下,STATCOM 输出的零序电流可以通过接地变压器形成通路。

2 控制策略分析

下面重点分析在这种新拓扑结构下参考电流的生成方法。设系统电压仅包含基波正序分量,a 相系统电压可表示为:

$$u_{sa} = U_p \cos \omega t \quad (1)$$

其中, U_p 是基波正序电压的幅值。

设电网负荷电流 i_{la}, i_{lb}, i_{lc} 中仅包含基波分量,由正序电流和负序电流 2 个部分构成,可表示为:

$$\begin{cases} i_{la} = I_1 \cos(\omega t - \varphi_1) + I_2 \cos(\omega t - \varphi_2) \\ i_{lb} = I_1 \cos(\omega t - \varphi_1 - 120^\circ) + I_2 \cos(\omega t - \varphi_2 + 120^\circ) \\ i_{lc} = I_1 \cos(\omega t - \varphi_1 + 120^\circ) + I_2 \cos(\omega t - \varphi_2 - 120^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

其中, I_1 和 φ_1 分别为基波正序电流的幅值和相位; I_2 和 φ_2 分别为基波负序电流的幅值和相位。

采用双 dq 方法对负荷电流进行瞬时分解,并进行低通滤波后得:

$$\begin{cases} I_{pd} = I_1 \cos \varphi_1 \\ I_{pq} = I_1 \sin \varphi_1 \\ I_{nd} = I_2 \cos \varphi_2 \\ I_{nq} = I_2 \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, I_{pd} 和 I_{pq} 分别为正序电流的有功分量和无功分量; I_{nd} 和 I_{nq} 分别为负序电流的 d 轴分量和 q 轴分量。

若对正序无功电流和负序电流都进行补偿,则 STATCOM 的三相参考电流为:

$$\begin{cases} I_{refa} = I_{pq} e^{j90^\circ} + (I_{nd} + j I_{nq}) \\ I_{refb} = I_{pq} e^{j90^\circ} e^{-j120^\circ} + (I_{nd} + j I_{nq}) e^{j120^\circ} \\ I_{refc} = I_{pq} e^{j90^\circ} e^{j120^\circ} + (I_{nd} + j I_{nq}) e^{-j120^\circ} \end{cases} \quad (4)$$

若星接 STATCOM 直接输出上述参考电流,由于负序电流与三相电压并不正交,计算得到星接 STATCOM 三相的有功分量为:

$$\begin{cases} P_a = U_p I_{nd} \\ P_b = -\frac{1}{2} U_p I_{nd} + \frac{\sqrt{3}}{2} U_p I_{nq} \\ P_c = -\frac{1}{2} U_p I_{nd} - \frac{\sqrt{3}}{2} U_p I_{nq} \end{cases} \quad (5)$$

其中, P_a, P_b 和 P_c 分别表示由于输出负序电流产生的三相有功分量,由于链式 STATCOM 三相电容各自独立,因此该有功注入的不一致会导致星接 STATCOM 三相直流电压出现相间不平衡。

假设加入零序电流 I_0 ,能让式(4)中的负序电流也与系统电压垂直,使产生的有功为 0,则可以避免由于负序电流补偿而造成的相间电压不平衡。加入

零序电流后, STATCOM 的参考电流为:

$$\begin{cases} I_{\text{refa}} = I_{\text{pq}} e^{j90^\circ} + (I_{\text{nd}} + jI_{\text{nq}}) + I_0 \\ I_{\text{refb}} = I_{\text{pq}} e^{j90^\circ} e^{-j120^\circ} + (I_{\text{nd}} + jI_{\text{nq}}) e^{j120^\circ} + I_0 \\ I_{\text{refc}} = I_{\text{pq}} e^{j90^\circ} e^{j120^\circ} + (I_{\text{nd}} + jI_{\text{nq}}) e^{-j120^\circ} + I_0 \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)中新的参考电流重新计算三相有功, 令各相有功为 0, 计算得零序电流的表达式为:

$$I_0 = -I_{\text{nd}} + jI_{\text{nq}} \quad (7)$$

根据零序电流的表达式进一步整理式(6), 得到 STATCOM 总的输出参考电流:

$$\begin{cases} I_{\text{refa}} = (I_{\text{pq}} + j2I_{\text{nq}}) e^{j90^\circ} \\ I_{\text{refb}} = (I_{\text{pq}} - 2I_{\text{nd}} - I_{\text{nq}}) e^{j90^\circ} e^{-j120^\circ} \\ I_{\text{refc}} = (I_{\text{pq}} + \sqrt{3}I_{\text{nd}} - I_{\text{nq}}) e^{j90^\circ} e^{j120^\circ} \end{cases} \quad (8)$$

从中可以看出, 加入零序电流后, STATCOM 三相的参考电流与各相的系统电压分别垂直, 因此不会由于补偿负序电流引起相间三相电压不平衡。式(8)中 STATCOM 的参考电流包含三部分: 基波正序无功电流、负序电流和零序电流。

为进一步说明上述电量间的关系, 仅考虑负序分量, 根据式(6)画出系统相电压、负序电流、零序电流和总参考电流的相量图见图 4, 可以看出, 在加入了零序电流 I_0 后, STATCOM 的三相参考电流 I_{refa} 、 I_{refb} 、 I_{refc} 分别和三相系统电压 U_{sa} 、 U_{sb} 、 U_{sc} 垂直, 避免了由于补偿负序电流造成的三相有功波动。

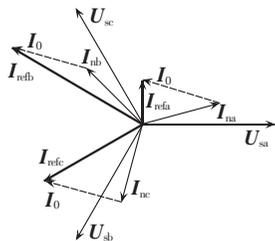


图 4 参考电流相量图

Fig.4 Phasor diagram of reference current

由于器件差异或系统扰动, STATCOM 的三相直流电压会不可避免地出现差异, 因此需要对相间的直流电压进行平衡控制。星接 STATCOM 一般采用加入零序电压控制相间平衡, 由于本文采用了新的拓扑结构, 需要将零序电压转换为零序电流来控制。计算过程如下: 根据三相电压与目标值的差值进行 PI 控制, 得到用于控制三相相间平衡需要转移的有功功率。以 a 相为例, P_m 计算框图见图 5, 同理可得 P_{nb} 和 P_{nc} , 其中 U_{da} 表示实测的 a 相直流总电压, U_{set} 表示设定的直流电压参考目标。

假设在参考电流中加入零序电流分量 I_0 能提

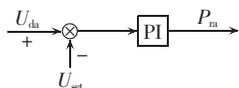


图 5 用于相间直流平衡控制的有功计算方法
Fig.5 Active power calculation method for inter-phase DC voltage balance control

供相间能量转移, 表示为 $I_{00} = I_{00d} + jI_{00q}$, 令它与基波正序电压作用得到的功率能平衡相间功率, 有:

$$\begin{cases} P_{\text{ra}} = \text{Re}(U_{\text{P}}(I_{00d} + jI_{00q})^*) \\ P_{\text{rb}} = \text{Re}(U_{\text{P}} e^{-j120^\circ} (I_{00d} + jI_{00q})^*) \\ P_{\text{rc}} = \text{Re}(U_{\text{P}} e^{j120^\circ} (I_{00d} + jI_{00q})^*) \end{cases} \quad (9)$$

计算得 I_{00} 为:

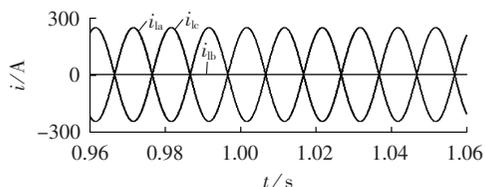
$$I_{00} = I_{00d} + jI_{00q} = -\frac{P_{\text{ra}}}{U_{\text{P}}} + j\frac{P_{\text{rc}} - P_{\text{rb}}}{\sqrt{3}U_{\text{P}}} \quad (10)$$

将式(10)中用于控制相间平衡的零序电流分量 I_{00} 加入到式(6)的参考电流中, 即得到了 STATCOM 完整的三相参考电流表达式, 它包含 4 个部分: 基波正序无功电流、负序电流、平衡负序电流功率波动的零序电流 I_0 和控制相间平衡的零序电流 I_{00} 。

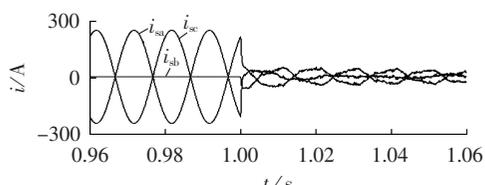
3 仿真效果

根据图 2 的接线原理, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型。模型中采用了自行构建的 10 kV/6 Mvar 的链式 STATCOM 模型, 由 4 个 H 桥级联而成, 连接电抗为额定值的 12%, 即 6.37 mH, 在常规的电流分解、瞬时电流跟踪和载波移相方法基础上, 加入上述负序电流补偿方法和相间直流电压控制方法。采用电流源模拟负荷, 其正序无功和负序的幅值相位可设定。STATCOM 工作在负荷补偿模式, 仿真步长为 $10 \mu\text{s}$ 。

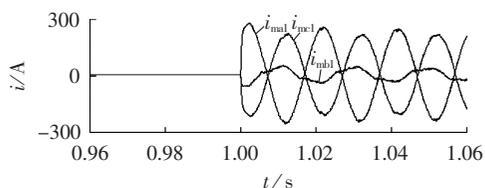
设置负荷中的负序电流为 $100 \angle -30^\circ \text{ A}$, 正序无功电流为感性 100 A, 在 1 s 时 STATCOM 解锁补偿, 响应波形见图 6。从图中可以看出, 当 STATCOM 未投入补偿时, 三相系统电流 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 和三相负荷电流 i_{la} 、 i_{lb} 、 i_{lc} 一致; 在 1 s STATCOM 解锁投入补偿后, 系统电流中的正序无功和负序电流大幅减小, 接近于 0,



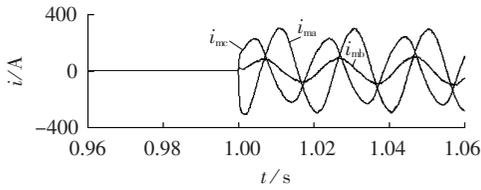
(a) 三相负荷电流



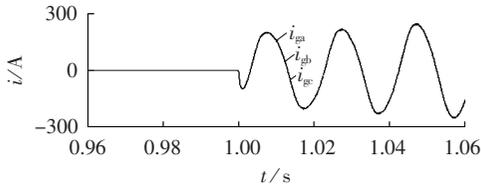
(b) 三相系统电流



(c) STATCOM 注入系统的三相电流



(d) STATCOM 装置输出的三相电流



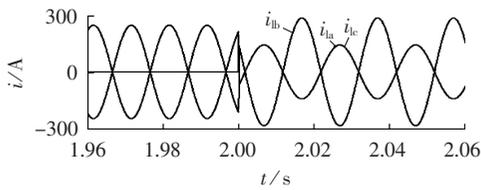
(e) 接地变压器中的三相电流

图 6 STATCOM 投入补偿时的响应波形

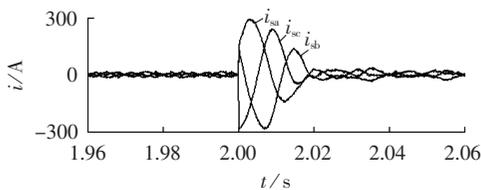
Fig.6 Response waveforms when STATCOM is put into operation

STATCOM 注入系统的电流 i_{ma1} 、 i_{mb1} 、 i_{mc1} 与负荷电流同幅反相,起到了补偿效果,此时 STATCOM 装置输出的电流 i_{ma} 、 i_{mb} 、 i_{mc} 与各相系统电压垂直,其中的零序电流 i_{ga} 、 i_{gb} 、 i_{gc} 流入接地变压器,三相波形一致。

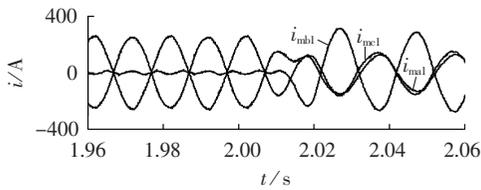
在 2 s 时改变负荷中负序电流为 $100 \angle -150^\circ \text{A}$, 响应波形见图 7。可以看出,在负荷电流突变后, STATCOM 注入系统的电流 i_{ma1} 、 i_{mb1} 、 i_{mc1} 在 20 ms 内完全跟踪上了负荷的变化,使系统电流在突变时刻前后均接近于 0。



(a) 三相负荷电流



(b) 三相系统电流

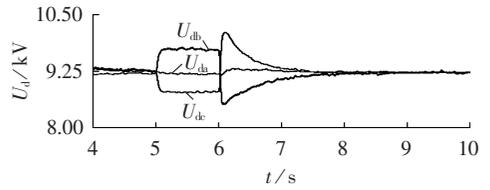


(c) STATCOM 注入系统的三相电流

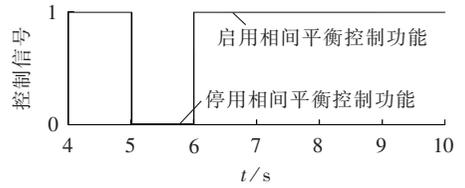
图 7 负荷突变时的响应波形

Fig.7 Response waveforms when load changes suddenly

为了验证上述相间直流平衡方法,在模型中设定 5~6 s 间停用相间平衡控制功能,其余时间启用。该期间三相的直流电压总和的波形见图 8,图中的直流电压表示各相内各链节的直流电压总和。在停用相间平衡控制功能后,相间的直流电压总和的差



(a) 各相的直流电压总和



(b) 启用/停用相间平衡功能的控制信号

图 8 三相相间直流电压平衡控制效果

Fig.8 Effect of inter-phase DC voltage balance control

值达到了 950 V 左右;启用相间平衡功能后,经过 1.4 s 左右的调节,三相直流电压均接近目标值 9.2 kV,相间相差不到 100 V,平衡控制效果非常明显。

4 实际装置测试

为了验证上述原理推导和仿真分析,搭建了测试平台,STATCOM 和接地变压器中性点连接后接入 10 kV 系统。测试平台相关的参数如下:系统电压为 10 kV;STATCOM 容量为 2 Mvar /10 kV,STATCOM 单相链节数为 12 个,STATCOM 连接电抗为 19.1 mH,STATCOM 直流电压参考为 9.2 kV;接地变压器额定容量为 400 kV·A/10 kV;单相电阻负荷为 180 Ω 。

使用单相电阻负荷经断路器接入系统的 B 相和 C 相间,以产生不平衡的负荷电流。STATCOM 并网运行后,先工作在恒无功模式,再手动切换到负荷补偿模式,STATCOM 工作在负荷补偿模式时实时检测并补偿基波正序无功电流和负序电流。模式切换的瞬间,用示波器捕捉到系统电流变化的波形见图 9。其中,通道 1 为系统 a 相和 b 相间的线电压 u_{sb} ,通道 2、3、4 分别为三相系统电流 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 。从图中可以看出,STATCOM 切换到负荷补偿模式后,系统电流从三相不平衡恢复到比较平衡,只包含有功正序电流分量。

在 STATCOM 切换到负荷补偿模式后,通过界

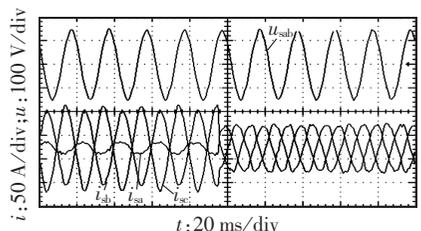


图 9 实际装置测试补偿波形

Fig.9 Tested compensating waveforms of real device

面读取三相直流电压分别为 9.155 kV、9.119 kV、9.149 kV,表明相间直流电压控制方法起到了较好的平衡效果。

5 工程应用分析

采用增加接地变压器并将其中性点相连的新拓扑结构,为星接链式 STATCOM 提供了一种新的实现不平衡补偿功能的方案。在实际工程项目的改造方案选择时,也可以采用增加 Δ/Y 连接变压器的方式,下面对这 2 种方式进行比较。

以 10 kV/2 Mvar 的星接链式 STATCOM 现场改造为例,该装置的额定电流为 115 A。根据式(10),装置在补偿负序时输出电流最大为负序电流的 2 倍,因此最大能补偿的负序电流为 57 A,由于接地变压器中流过的零序电流和负序电流幅值相等,因此选择容量为 1 MV·A 的干式接地变压器,型号为 DKSC-1000/10;若采用增加 Δ/Y 连接变压器的方案,选择容量 2 MV·A 的干式变压器,型号为 SCB9-2000/10,2 种方案的各技术指标比较见表 1。

表 1 2 种补偿方案的工程比较
Tab.1 Comparison of engineering data between two methods

参数	方案 1	方案 2
方式	增加接地变压器	增加 Δ/Y 变压器
型号	DKSC-1000/10	SCB9-2000/10
参考价格	10.1 万元	20.9 万元
尺寸	1390 mm×785 mm×1250 mm	1700 mm×1120 mm×1640 mm
空载损耗	1.5 kW	3.47 kW
负载损耗	7.9 kW	15.3 kW
重量	1690 kg	4200 kg

从表 1 可以看出,以 2 Mvar/10 kV 的工程改造为例,采用增加接地变压器的方式比采用增加 Δ/Y 变压器的方式在价格上要减少一半,体积要减小 55% 以上,空载损耗和负载损耗都有明显的降低。

有以下 2 点需要指出。

a. 接地变压器在设计上有较大的过载倍数,根据 IEEE Std C62.92.3—1993 中关于中性点不接地系统中接地变压器的标准,不同故障切除时间下过载耐受能力不一样,10 s 内的过载倍数可达 10 倍,2 h 内的过载倍数可达 1.4 倍。接地变压器能否长期承受零序电流,主要取决于制造工艺和散热水平,可进一步研究测试。

b. 可以根据实际应用中需要补偿的负序电流的大小选择接地变压器容量,接地变压器额定容量可以比 STATCOM 容量小,这点可以在控制策略上灵活限定和处理。

6 结论

本文提出了星接链式 STATCOM 和接地变压器

中性点相连的新拓扑结构,可以实现不平衡负荷补偿,并分析了相应的零序电流控制方法。所提补偿方式有如下特点:

a. 星接链式 STATCOM 和接地变压器的中性点相连后,在输出负序电流时,可通过注入零序电流的方式使 STATCOM 的参考电流垂直于各相电压,从而避免了由于负序补偿而引起的有功波动,文中推导出该零序电流的幅值与负序电流幅值相同;

b. 在这种新的拓扑结构下,注入另一分量的零序电流可有效控制三相相间的直流电压平衡;

c. 接地变压器的容量大小可以根据实际需要补偿的负序电流大小来灵活选择。

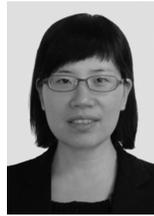
仿真和整机测试表明,该方法在理论和实践上都是可行的,不平衡电流的补偿效果和相间直流电压控制的平衡效果都较好;工程应用分析表明,增加接地变压器的方式与增加 Δ/Y 连接变压器的方式相比,在成本、占地和损耗上均具有优势。

参考文献:

- [1] AKAGI H,INOUE S,YOSHII T. Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration [J]. IEEE Trans on Industry Applications,2007,43(4):1041-1049.
- [2] PENG F Z,LAI J S,MCKEEVER J W,et al. A multilevel voltage source inverter with separated sources for static VAR generation [J]. IEEE Trans on Industry Applications,1996,32(5):1130-1138.
- [3] 杨振宇,许胜,许杏桃. 高压大容量 D-STATCOM 主电路的比较与分析 [J]. 电力自动化设备,2011,31(6):50-55.
YANG Zhenyu,XU Sheng,XU Xingtao. Comparison and analysis of high-voltage large-capacity D-STATCOM main circuit [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):50-55.
- [4] SONG Q,LIU W H,YUAN Z C. Multilevel optimal modulation and dynamic control strategies for STATCOMs using cascaded multilevel inverters [J]. IEEE Trans on Power Delivery,2007,22(3):1937-1946.
- [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.
GENG Juncheng,LIU Wenhua,YU Xufeng,et al. Modeling of cascade STATCOM [J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(6):66-70.
- [6] 郭源博,周鑫,张晓华,等. 电网不平衡条件下 STATCOM 的非线性控制 [J]. 电力自动化设备,2012,32(2):50-55.
GUO Yuanbo,ZHOU Xin,ZHANG Xiaohua,et al. Nonlinear control of STATCOM under unbalance condition [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):50-55.
- [7] HAN C,YANG Z,CHEN B,et al. Evaluation of cascade multilevel converter based STATCOM for arc furnace flicker mitigation [J]. IEEE Trans on Industry Applications,2007,43(2):378-385.
- [8] BLAZIC B,PAPIC I. Improved D-STATCOM control for operation with unbalanced currents and voltages [J]. IEEE Trans on Power Delivery,2006,21(1):225-23.
- [9] 朱永强,宋强,刘文华,等. 用于不平衡负荷补偿的大容量 D-STATCOM 主电路选择 [J]. 电力系统自动化,2005,29(7):58-64.

- ZHU Yongqiang, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. The analysis of D-STATCOM's circuit for large unbalance load compensation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 58-64.
- [10] 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 Yongqiang, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. The optimize design of D-STATCOM for unbalance load compensation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 65-70.
- [11] 朱永强. D-STATCOM 不平衡负荷补偿电流的 3 种设计方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 75-79.
- ZHU Yongqiang. Three design schemes of compensation current for D-STATCOM used for unbalance load [J]. 2007, 31(1): 75-79.
- [12] 王建曠, 伏祥运, 纪延超. 不平衡补偿时静止同步补偿器的分相控制[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(9): 27-30.
- WANG Jianze, FU Xiangyun, JI Yanchao. Individual phase control of D-STATCOM under unbalanced compensation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(9): 27-30.
- [13] 黄伟雄, 刘锦宁, 王永源, 等. 35 kV \pm 200 Mvar STATCOM 系统总体设计[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 136-142.
- HUANG Weixiong, LIU Jinning, WANG Yongyuan, et al. Overall design of 35 kV \pm 200 Mvar STATCOM system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 136-142.
- [14] 杨昆, 陈磊, 陈国柱. DSTATCOM 补偿不平衡负载分序控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 36-41.
- YANG Kun, CHEN Lei, CHEN Guozhu. Individual sequence control of DSTATCOM compensation for unbalance load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 36-41.
- [15] SONG Qiang, LIU Wenhua. Control of a cascade STATCOM with star configuration under unbalanced conditions [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(1), 45-58.
- [16] 许树楷. 链式静止同步补偿器电弧炉负荷补偿研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007.
- XU Shukai. Research on cascaded STATCOM for arc furnace load compensation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [17] 许树楷, 宋强, 朱永强, 等. 用于不平衡补偿的变压器隔离型链式 D-STATCOM 的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 137-143.
- XU Shukai, SONG Qiang, ZHU Yongqiang, et al. Research on the transformer isolated multilevel H-bridges D-STATCOM for unbalanced load compensation [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 137-143.
- [18] 盘宏斌, 罗安, 赵伟, 等. 基于 DSP 的不平衡补偿和单纯形优化的静止同步补偿器 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 51-55.
- PAN Hongbin, LUO An, ZHAO Wei, et al. Unbalanced compensation and simplex optimization of static var compensator on DSP [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 51-55.
- [19] 韦钢, 陈森环, 蔡阳, 等. 基于瞬时无功功率理论的三相不平衡负荷补偿 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 59-63.
- WEI Gang, CHEN Senhuan, CAI Yang, et al. Compensation for three-phase unbalanced load based on instantaneous reactive power theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 59-63.

作者简介:



赵香花

赵香花(1981-),女,湖南沅江人,博士研究生,研究方向为高压无功补偿 STATCOM 技术 (E-mail: zhaoxianghua@tsinghua.org.cn);

陈远华(1977-),男,福建福州人,博士,研究方向为高压变频、动态无功补偿和有源滤波技术;

刘文华(1968-),男,湖南临湘人,教授,研究方向为柔性交流输电系统及电力电子

装置;

张秀娟(1977-),女,湖北黄冈人,博士,研究方向为动态无功补偿、有源滤波、低电压穿越补偿技术;

李刚(1977-),男,北京人,硕士,研究方向为配电网消弧补偿、动态无功补偿技术。

New topology for unbalance compensation of cascaded STATCOM with star configuration

ZHAO Xianghua¹, CHEN Yuanhua², LIU Wenhua¹, ZHANG Xiujuan², LI Gang²

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. SiYuan Electrical Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: A new topology is proposed for the unbalance load compensation of cascaded STATCOM with star configuration, which connects the neutral point of an additional grounding transformer with STATCOM to form the pass of zero-sequence current needed by negative-sequence compensation. The way to generate the reference current and the zero-sequence current is explained by the power analysis and the method to control the DC voltage balance among phases is deduced. Simulative and experimental results show that, with the proposed topology and control method, the negative-sequence current of load is preferably compensated and the DC voltage balance among phases preferably satisfied. Engineering analysis shows that, compared with the Δ/Y configuration, the proposed configuration is more cost-effective and space-effective.

Key words: cascaded STATCOM with star configuration; grounding transformer; compensation; voltage control; topology