Vol.36 No.2 Feb. 2016

SVG 用于单相负荷电能质量综合治理时 相电流指令的计算

王宝安,商 姣,陈 豪

(东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

摘要:针对三角形级联静止无功发生器(SVG)用于单相负荷电能质量综合治理时指令电流的计算方案进行 了研究。将指令电流分为基波电流指令和谐波电流指令两部分。其中,基波电流指令的计算采用基于电纳补 偿原理的 Steinmetzs 理论,谐波电流指令的计算可采用单相谐波全补偿策略、以环流等于 0 为约束原则的谐 波补偿策略、谐波均分补偿策略这 3 种谐波电流补偿策略,并从 SVG 每相电流有效值、SVG 中开关器件的通 态损耗、SVG 中开关器件的电流容量 3 个角度对比了 3 种谐波补偿策略。在 PSCAD 中建立了低电压七电平 SVG 的仿真模型,并搭建了低压实验样机,分别通过仿真和实验验证了所述指令电流计算方案的正确性。 关键词:静止无功发生器;三角形连接;单相负荷;电能质量;指令电流;谐波分配;谐波分析;计算 中图分类号:TM 76 文献标识码:A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.010

0 引言

随着电力电子技术的广泛应用,配电网中的三 相不平衡负荷、非线性负荷越来越多^[12]。为保证配 电网的电能质量,各种电能质量治理装置被引入配 电网中。最初,配电网的功率因数和三相不平衡度 是衡量电能质量优劣的2个重要指标。为补偿电网 中的无功电流和三相不平衡,工程应用中多采用静 止无功补偿器(SVC)和静止无功发生器(SVG)^[34]这 类电能质量治理装置。SVC的体积庞大,工作时会 产生谐波电流,且动态响应速度慢、补偿范围较窄; 而 SVG 具有体积小、电流畸变率小、动态响应速度 快等优点^[5]。

然而,在配电网中,电能质量问题不仅仅局限 于低功率因数和三相不平衡,如电气化铁路牵引负 荷,其大多为单相整流桥形式,如韶山-1型机车、韶 山-3型机车,会产生大量谐波电流,远远超过国标 所规定的限值^[6];工业中广泛应用的电弧炉、电渣重 熔炉也会向电网中注入大量谐波电流^[7]。随着用户 对电能质量要求的提高,在补偿三相不平衡和无功 电流的同时,电压、电流的总谐波畸变率(THD)也 是电能质量优劣的重要评价指标之一。因此,对于 这些容量大、不平衡程度严重、含有大量谐波的负 荷,为了保证配电网的电能质量,需要重点补偿治 理^[8-10]。鉴于 SVG 的诸多优点,针对这些负荷,可以 采用 SVG 作为其电能质量治理装置^[11-13],对负荷的 电能质量问题进行综合补偿,即同时补偿三相不平 衡、无功和谐波电流。

收稿日期:2015-03-27;修回日期:2016-01-09 基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20130627) Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20130627)

对于配网 10 kV 电压等级,常采用 H 桥级联结构 的 SVG 作为补偿装置:为补偿三相不平衡,SVG 通常 采用三角形连接形式^[14]。研究三角形级联 SVG 的文 献已相当丰富,主要侧重于三相不平衡和无功电流的 补偿电流指令计算[15]、补偿原理和控制策略[16-17]的研 究。文献[18]研究了 SVG 补偿基波不平衡电流的 3 种设计方案,包括电纳补偿原理、最大相电流最小化 设计和无零序设计方案,并进行了比较。当 SVG 中各 H 桥的直流电容采用悬浮形式时,为满足 H 桥电容电 压恒定,H桥两端电压和流过H桥的电流的相位差 应保持在 90° 左右,此时,对于基波不平衡电流指令 的设计方案,只能选用电纳补偿原理。目前,对于三 角形级联 SVG 综合补偿的研究较少,包括 SVG 各相 补偿电流指令的计算方法,特别是缺乏 SVG 各相谐波 电流分配方案的对比分析。因此,本文将针对电气化 铁路负荷这类单相负荷,讨论将三角形级联 SVG 用于 其电能质量综合治理时指令电流的计算方案。

本文首先介绍用于单相负荷电能质量综合治理 的三角形级联 SVG 的拓扑结构和工作原理;然后重 点讨论如何计算 SVG 用于单相负荷综合补偿时的指 令电流,将其分为基波电流指令和谐波电流指令计算 两部分。基波电流指令包括补偿三相不平衡和无功电 流的指令,其计算采用基于电纳补偿原理的 Steinmetzs 理论;谐波电流指令的计算有 3 种方法,分别为单相 谐波全补偿策略、以环流等于 0 为约束原则的谐波补 偿策略、谐波均分补偿策略。文中从 SVG 每相电流 有效值、SVG 中开关器件的通态损耗、SVG 中开关器 件的电流容量 3 个角度对比了 3 种谐波补偿策略。 最后在 PSCAD 软件中搭建了低压三角形 SVG 模型, 并搭建了实验样机,对 3 种谐波补偿策略进行了仿真 和实验验证。

1 三角形级联 SVG 拓扑及工作原理

本文所述三角形级联 SVG 的基本拓扑结构如 图 1 所示,多个 H 桥级联后串接滤波电抗器,组成 三角形级联 SVG 的一相,即图 1 中 ab 相、bc 相和 ca 相。将 ab 相、bc 相、ca 相连接成三角形结构,并从 a、b、c 相引出 3 个端子,分别并接至电网的 A、B、C 三相上。

图 1 中, u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 为电网三相电压; i_{sa} 、 i_{sb} 和 i_{sc} 为电网三相电流; i_{la} 、 i_{lb} 、 i_{lc} 为负荷的三相电流; i_{a} 、 i_{b} 、 i_{c} 为三角形 SVG 的三相线电流; i_{ab} 、 i_{bc} 、 i_{ca} 为三角 形 SVG 的三相相电流。

若图 1 中的单相负荷为非线性负荷,且与电网存在无功交换。在补偿装置 SVG 未接入时,电网电流三相不平衡,且含有谐波、无功电流。SVG 能够通过检测负荷电流,计算出需要补偿的三相不平衡、无功和谐波电流的指令,通过控制 H 桥中 IGBT 的通断得到相应的补偿电流,从而降低电网电流的三相不平衡度和谐波畸变率,提高电网侧的功率因数。

2 用于单相负荷综合补偿时指令电流计算

三角形级联 SVG 的相电流与线电流满足如下 约束关系^[19]:

i _a		1	0	-1	$\left i_{ab} \right $		i_{ab}	
$i_{ m b}$	=	-1	1	0	$i_{ m bc}$	=A	$i_{ m bc}$	(1)
$i_{ m c}$		0	-1	1	i_{ca}		i_{ca}	

当负荷一定时,由 SVG 提供的补偿线电流也是

一定的,即*i*a,*i*b,*i*e,唯一确定。然而|A|=0,即*i*ab,*i*be,*i*ca 有无数多种解。因此,可以根据不同需求,增加约束 条件,得到满足不同需求的相电流指令。本文将 SVG 用于单相负荷的综合补偿,其电流指令的计算分为基 波电流指令和谐波电流指令两部分。

2.1 基波电流指令

基波电流指令包括补偿三相不平衡电流和无功 电流的指令。由于 SVG 中各 H 桥直流侧为悬浮电 容,为维持电容电压恒定,需使 SVG 的每相电压和电 流的相位差恒定在 90° 左右。因此,对于基波电流指 令的计算,只能采用基于电纳补偿原理的 Steinmetzs 理论^[6]。

设电网电压相量为: $U_a=U \angle 0^\circ$, $U_b=\alpha^2 U_a$, $U_c=\alpha U_a$, 其中 $\alpha = e^{j2\pi/3}$,电网线电压相量为 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{cao} 设负 荷中的基波电流分别为 i_{la1} 、 i_{lb1} 、 i_{lc1} ,对应相量为 $I_{la1} = I_1 e^{j\varphi}$ 、 I_{lb1} 、 I_{lc1o}

根据 Steinmetzs 理论,三角形 SVG 补偿三相不平 衡和无功电流的三相等效导纳值为^[4]:

$$\begin{vmatrix}
B_{ab} = -[\operatorname{Im}(\boldsymbol{I}_{la1}) + \operatorname{Im}(\alpha \boldsymbol{I}_{lb1}) - \operatorname{Im}(\alpha^2 \boldsymbol{I}_{lc1})]/(3U) \\
B_{bc} = -[-\operatorname{Im}(\boldsymbol{I}_{la1}) + \operatorname{Im}(\alpha \boldsymbol{I}_{lb1}) + \operatorname{Im}(\alpha^2 \boldsymbol{I}_{lc1})]/(3U) \\
B_{ca} = -[\operatorname{Im}(\boldsymbol{I}_{la1}) - \operatorname{Im}(\alpha \boldsymbol{I}_{lb1}) + \operatorname{Im}(\alpha^2 \boldsymbol{I}_{lc1})]/(3U)
\end{cases}$$

可以在 u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 过零时, 对 $i_{hal}, i_{hbl}, i_{hcl}$ 分别采样, 得到 Im(I_{hal})、Im(αI_{hbl})、Im($\alpha^2 I_{lcl}$), 进而得到 B_{ab}, B_{bc} 、 B_{cao} SVG 的基波补偿电流指令对应的相量即为:

$$\begin{vmatrix} I_{ab1} = U_{ab} j B_{ab} \\ I_{bc1} = U_{bc} j B_{bc} \\ I_{ca1} = U_{ca} j B_{ca} \end{cases}$$
(3)



图 1 三角形级联 SVG 拓扑结构 Fig.1 Topological structure of delta-connected SVG

63

2.2 谐波电流指令

设负载线电流的第 n 次谐波瞬时值分别为 i_{lan} 、 i_{lbn} 、 i_{len} ;三角形 SVG 线电流的第 n 次谐波瞬时值分别 为 i_{an} 、 i_{bn} 、 i_{en} ,相电流的第 n 次谐波指令分别为 i_{abn} 、 i_{ben} 、 i_{can} ;电网电流的第 n 次谐波瞬时值分别为 i_{san} 、 i_{sen} 。

策略1:单相谐波全补偿策略。

针对图 1 所示单相负荷,并接在电网线电压 u_{ab}上, 只有 A 相线和 B 相线上存在谐波电流,且三角形 SVG 的 ab 相也是并接在电网线电压 u_{ab}上,因此,只要使 SVG 的 ab 相作为单相有源滤波器,对单相负荷的谐 波电流进行补偿,而 SVG 的 bc 相和 ca 相不参与负载 谐波电流的补偿。SVG 的每相电流第 n 次谐波指令 可以表示为:

$$\begin{cases} i_{abn} = -i_{lan} \\ i_{bcn} = 0 \\ i_{can} = 0 \end{cases}$$
(4)

若 SVG 的实际补偿电流等于指令电流,根据式 (1)、(4)得 SVG 线电流的第 n 次谐波为:

$$\begin{aligned}
i_{an} &= -i_{lan} \\
i_{bn} &= i_{lan} &= -i_{lbn} \\
i_{an} &= 0
\end{aligned}$$
(5)

根据基尔霍夫电流定律,电网中的第 n 次谐波电流瞬时值为:

$$i_{\rm san} = i_{\rm sbn} = i_{\rm scn} = 0 \tag{6}$$

这说明式(4)的解达到了对负荷谐波电流进行 补偿的目的。

策略2:以环流等于0为约束原则的补偿策略。

要使电网侧不含谐波,则应使式(5)、(6)成立。 而当 SVG 的线电流的第n次谐波一定时,根据式(1) 中|A|=0,SVG 的相电流的第n谐波指令有无数 组解,式(1)只有 2 个约束条件可用。增加"三角形 SVG 内的环流等于 0"的约束条件,因此,以环流等 于 0 为约束原则的谐波补偿策略所增加的约束条 件为:

$$i_{abn} + i_{bcn} + i_{can} = 0 \tag{7}$$

根据式(1)和式(7),可以求得以环流等于0为约束原则的谐波补偿策略的 SVG 的每相电流的第 *n*次谐波指令:

$$i_{abn} = i_{an} - i_{bn} = -\frac{1}{3} i_{lan} - \frac{1}{3} i_{lbn} = -\frac{2}{3} i_{lan}$$

$$i_{bcn} = i_{bn} - i_{cn} = \frac{1}{3} i_{lan} - 0 = \frac{1}{3} i_{lan}$$

$$i_{can} = i_{cn} - i_{an} = 0 + \frac{1}{3} i_{lan} = \frac{1}{3} i_{lan}$$
(8)

式(8)的解亦达到了对负荷谐波电流进行补偿 的目的。

策略3:谐波均分补偿策略。

设 Iabn、Ibon、Ican 分别为三角形 SVG 相电流的第 n

次谐波指令有效值。以3次谐波为例进行说明,三角 形 SVG 的线电流3次谐波相量和相电流3次谐波 相量满足图2所示关系,根据图1所示单相负载与电 网连接形式,可设 SVG 的线电流3次谐波有效值分 别为:

$$\begin{cases} I_{a3} = I_{b3} = I_{3} \\ I_{c3} = 0 \end{cases}$$
(9)

由于式(1)中的|A|=0,所以SVG的相电流3 次谐波指令对应的相量 I_{abs} 、 I_{cas} 有无数组解,即 P点可以在平面xOy内取任意点。



谐波均分补偿策略求解的约束原则为 $Max(I_{ab3}, I_{bc3}, I_{ca3})(I_{ab3}, I_{ca3}, f_{ca3})$ ($I_{ab3}, I_{bc3}, I_{ca3}$) ($I_{ab3}, I_{ab3}, I_{bc3}, I_{ca3}$) ($I_{ab3}, I_{bc3}, I_{ca3}$) ($I_{ab3}, I_{bc3}, I_{ca3}$) ($I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}$) ($I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}$) ($I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3}$) ($I_{ab3}, I_{ab3}, I_{ab3},$

$$\begin{cases} PO = \sqrt{x^2 + y^2} \\ PA = \sqrt{(x - I_3)^2 + y^2} \end{cases}$$
(10)

当 P 点为 AO 中点($I_3/2,0$)时, $PO = PA = I_3^2/4$; 当 $x \ge I_3/2$ 时, $PO \ge I_3^2/4$; 当 $x \le I_3/2$ 时, $PA \ge I_3^2/4$ 。 综上, 当 P 点为 AO 中点时, $Max(I_{ab3}, I_{bc3}, I_{c3})$ 取得最 小值。同理, 可求得各次谐波电流满足 $Max(I_{abn}, I_{bcn}, I_{can})$ 取得最小值约束条件的相电流谐波指令对应的 相量:

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_{abn} = \boldsymbol{I}_{an}/2 \\ \boldsymbol{I}_{bcn} = \boldsymbol{I}_{can} = -\boldsymbol{I}_{an}/2 = \boldsymbol{I}_{bn}/2 \end{cases}$$
(11)

将各次相电流谐波指令叠加,可得:

$$\begin{aligned}
\dot{i}_{abn} &= \frac{\dot{i}_{an}}{2} = -\frac{\dot{i}_{lan}}{2} \\
\dot{i}_{bcn} &= \dot{i}_{can} = -\frac{\dot{i}_{an}}{2} = \frac{\dot{i}_{lan}}{2}
\end{aligned} (12)$$

根据基尔霍夫电流定律,电网谐波电流:

$$i_{\mathrm{san}} = i_{\mathrm{sbn}} = i_{\mathrm{scn}} = 0 \tag{13}$$

式(12)的解也达到了对负荷谐波电流进行补偿的目的。

3 3种谐波补偿策略的比较

3.1 SVG 的每相补偿电流有效值

a. 基波补偿电流。

根据图1所示的单相负荷与电网的连接形式, 可知:

$$\boldsymbol{I}_{\text{lal}} = \boldsymbol{I}_1 e^{j\varphi}, \quad \boldsymbol{I}_{\text{lbl}} = -\boldsymbol{I}_1 e^{j\varphi}, \quad \boldsymbol{I}_{\text{lcl}} = 0$$
(14)

结合式(2)、(3)、(14)可得 SVG 的各相基波补 偿电流有效值分别为:

$$\begin{vmatrix} I_{ab1} = \left| I_1 \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) \right| \\ I_{bc1} = I_{ca1} = \left| I_1 \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{3}\right) / \sqrt{3} \right|$$
(15)

由式(15)和图 3 可知, I_{ab1} 的最大值为 I_1 , I_{bc1} 、 I_{cal} 的最大值为 $\frac{I_1}{\sqrt{3}}$ 。且当 I_{ab1} 有最大值时, $I_{bc1} = I_{cal} = 0$; 当 I_{bc1} 、 I_{cal} 有最大值时, $I_{ab1} = 0$ 。



图 3 SVG 的各相基波补偿电流有效值变化情况 Fig.3 RMS curve of SVG fundamental compensating current for three phases

b. 谐波补偿电流。

若采用单相谐波全补偿策略计算 SVG 的相电流谐波指令,根据非正弦电流的有效值定义及式(4), 所有次谐波的有效值为:

$$\begin{vmatrix} I_{abh} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{lan}^2} \\ I_{bch} = 0 \\ I_{cah} = 0 \end{aligned}$$
(16)

若采用以环流等于0为约束原则的补偿策略计 算 SVG 的相电流谐波指令,根据式(8),所有次谐波 的有效值为:

$$I_{abh} = \sqrt{\frac{4}{9} \sum_{n=2}^{\infty} I_{lan}^2}$$

$$I_{bch} = \sqrt{\frac{1}{9} \sum_{n=2}^{\infty} I_{lan}^2}$$

$$I_{cah} = \sqrt{\frac{1}{9} \sum_{n=2}^{\infty} I_{lan}^2}$$
(17)

若采用谐波均分补偿策略计算 SVG 的相电流 谐波指令,根据式(12),所有次谐波的有效值为:

$$I_{abh} = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{n=2}^{\infty} I_{lan}^{2}}$$

$$I_{bch} = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{n=2}^{\infty} I_{lan}^{2}}$$

$$I_{cah} = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{n=2}^{\infty} I_{lan}^{2}}$$
(18)

根据式(16)—(18),3种谐波补偿策略下 SVG 的 补偿电流的谐波有效值 *I*_{ab}之比为 6:4:3。

由于 SVG 的直流侧电压一定,出口侧的滤波电 抗器一经设计,电感值基本不变,当 SVG 能够补偿 的基波电流确定后,SVG 能够补偿的谐波电流就是 有限值,且三相一致。采用策略1进行谐波电流分 配时,有一相谐波有效值很大,其余两相均为零,不 能很好地利用 SVG 的谐波补偿能力;在实际应用中, 很有可能出现某一相的谐波电流有效值超出 SVG 的谐波电流补偿能力,导致 SVG 的补偿效果下降。

3.2 SVG 中开关器件的通态损耗

假设 SVG 的每一相在 1 个开关周期 T 内的等效电阻为 R,当 SVG 用于单相负荷的电能质量综合 治理时,三相 SVG 的通态损耗用 P 表示,则:

 $P = (I_{abl}^{2} + I_{abh}^{2})R + (I_{bcl}^{2} + I_{bch}^{2})R + (I_{cal}^{2} + I_{cah}^{2})R$ (19) 结合式(16)—(18),可得 3 种不同的谐波补偿 策略下三相 SVG 的通态损耗 $P^{(1)} \setminus P^{(2)} \setminus P^{(3)}$ 分别为:

$$\begin{cases} P^{(1)} = \left(I_{ab1}^{2} + 2I_{bc1}^{2} + \sum_{n=2}^{\infty} I_{lan}^{2}\right) R \\ P^{(2)} = \left(I_{ab1}^{2} + 2I_{bc1}^{2} + \frac{2}{3} \sum_{n=2}^{\infty} I_{lan}^{2}\right) R \\ P^{(3)} = \left(I_{ab1}^{2} + 2I_{bc1}^{2} + \frac{3}{4} \sum_{n=2}^{\infty} I_{lan}^{2}\right) R \end{cases}$$
(20)

由式(20)可知,针对相同的负荷情况,采用以环 流等于0为约束原则的谐波补偿策略时,三相 SVG 的 通态损耗最小,采用谐波均分补偿策略次之,采用单 相谐波全补偿策略时最大,即:

$$P^{(2)} < P^{(3)} < P^{(1)} \tag{21}$$

3.3 SVG 中开关器件的电流容量

用于电能质量治理的三相 SVG 在设计时通常 采用三相对称结构,即每一相的拓扑结构、电路元件 参数均相同。为满足补偿效果需要,SVG 开关器件 的电流容量通常按器件可能流过的最大电流并留有 一定裕量来确定。因此,按三相电流中有效值最大 的电流确定开关器件的电流容量。

结合式(15)—(18),可得 3 种不同的谐波补偿 策略下三相 SVG 的最大相电流有效值为:

$$\begin{cases} I^{(1)} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{1an}^2} \\ I^{(2)} = \sqrt{I_1^2 + \frac{4}{9} \sum_{n=2}^{\infty} I_{1an}^2} \\ I^{(3)} = \sqrt{I_1^2 + \frac{1}{4} \sum_{n=2}^{\infty} I_{1an}^2} \end{cases}$$
(22)

由式(22)可知,针对相同的负荷情况,采用谐波 均分补偿策略时,三相 SVG 的最大相电流有效值最 小,采用以环流等于 0 为约束原则的谐波补偿策略 次之,采用单相谐波全补偿策略时最大,即:

$$I^{(3)} < I^{(2)} < I^{(1)} \tag{23}$$

4 仿真分析

为验证本文所述 SVG 用于单相负荷电能质量 综合治理时电流指令计算方案的正确性,在 PSCAD 软件中搭建了七电平三角形 SVG 的模型,其负荷为 单相整流桥,硬件连接形式如图 1 所示,控制框图如 图 4 所示,SVG 参数如表 1 所示。图 4 中, udard v udas、 l.,



图 4 SVG 的控制框图 Fig.4 Block diagram of SVG control

表 1 三角形组 Table 1 Parameters of	&联 SVG 参数 delta-connected SVG
参数	参数值
电网线电压有效值	380 V
级联模块数	3
并网电抗器	2.5 mH
直流电压给定	690 V
直流侧电容	6 mF
开关频率	5 kHz

 l_{cah}

uki 分别为每相 H 桥模块直流测电压之和的指令 值、每相H桥模块直流测电压之和的实际值、模块1 直流测电压;iu为 ab 相为维持直流侧总电压恒定需 要的有功电流。

负荷电流波形如图 5 所示,由于负荷跨接在 A、 B相上,故C相负荷电流为零, ia和 iu 的谐波畸变率 为105.23%。



Fig.5 Waveform of load currents

当 SVG 投入后, SVG 检测负荷电流,并发出相 应的补偿电流,对单相负荷进行电能质量综合治理。 当采用不同的谐波电流补偿策略时,其每相电流波 形如图6所示。

计算出 SVG 每相电流的有效值和谐波有效值, 如表2所示。

根据 SVG 每相电流的有效值,可以近似算出单 位电阻下 SVG 的通态损耗为:P⁽¹⁾=1482.83 W,P⁽²⁾= 1175.58 W, $P^{(3)}$ =1254.44 W。显然, $P^{(2)} < P^{(3)} < P^{(1)}$, 与 式(21)结论相同。3种不同谐波补偿策略下,SVG的 补偿电流的谐波有效值 Inth 之比近似为 6:4:3。

补偿之后的电网电流波形如图 7 所示,为方便



图 6 SVG 的每相电流波形

Fig.6 Waveform of SVG phase-currents

表 2 SVG 的每相电流和谐波电流有效值

Table 2 RMS of SVG phase-current and harmonic current for three phases

_					-	11	
	策略	$I_{\rm ab}$	$I_{ m bc}$	I_{ca}	$I_{ m abh}$	$I_{ m bch}$	$I_{ m cah}$
	策略1	30.92	16.41	16.04	30.38	0	0
	策略2	21.03	19.24	19.05	20.27	10.08	10.23
	策略3	16.23	22.32	22.20	15.23	15.18	15.33

同时观察电网电流和电网电压,图中的电网电压为 实际值的 1/10。

由图 7 可知,补偿之后的电网电流接近正弦波, 且三相基本对称,功率因数接近单位功率因数;子模 块电容电压在指令值附近波动。

补偿前后的三相电网电流谐波畸变率及子模块 电容电压最大波动幅度百分比 udgm% 如表 3 所示。 由表3可知电流波形相比于补偿之前有了很大改 善,子模块电容电压的波动也在合理范围内。在实际 应用中,若要改善补偿效果,可以通过改进电流跟踪模块中的控制器实现,本文不再作讨论。



图 7 不同策略补偿效果



表 3 不同策略补偿效果 Table 3 Effect of different compensation strategies

	1		υ	
笙畋		THD/%		
來町	$i_{\rm sa}$	$i_{ m sb}$	$i_{ m sc}$	$-u_{\rm dcm}/\gamma 0$
补偿前	105.23	105.23	_	_
策略1	13.29	13.56	5.96	6.0
策略2	11.75	11.31	6.19	4.3
策略3	11.40	10.82	5.80	3.9

5 实验结果分析

为了验证本文所述的 3 种谐波电流补偿策略 (单相谐波全补偿策略、以环流等于 0 为约束原则的 谐波补偿策略、谐波均分补偿策略)的可行性,搭建 了低压七电平三角形级联 SVG 样机。样机主电路 如图 1 所示,每相含有 3 个级联模块。控制芯片采 用 TMS320FF28335,进行外环电压内环电流双环控 制;采用 FPGA 产生 PWM 驱动 IGBT。实验平台的 主要参数如表 1 所示。

将单相整流桥负载接于电网线电压 uab 上,其中 一相负荷电流如图 8 所示。



图 8 负荷电流波形 Fig.8 Waveform of load current

在所搭建的实验样机上,分别采用本文所述的 三角形级联 SVG 的 3 种谐波电流补偿策略进行实 验,补偿效果如图 9 所示。



如前文分析,三角形级联 SVG 三相谐波电流有效值最大的一相为 ab 相,*i*abb 波形如图 10 所示。

采用3种谐波补偿策略对负载电流进行补偿,根据示波器采样数据,计算补偿前后电网电流的谐波 畸变率和3种补偿策略的 Iabh 如表4所示。

采用3种谐波补偿策略,均达到了较好的补偿效果,3种补偿策略 Iabh 的比值基本满足前文分析结果6:4:3,从而验证了3种谐波补偿策略的正确性。



表 4 网侧电流谐波畸变率及 i_{abh}的 有效值 Table 4 THD of grid-side current

and RMS of i_{abb}

补偿策略	网侧电流 THD/%	$I_{\rm abh}/{ m A}$
补偿前	118.80	0
策略1	9.07	18.26
策略 2	9.56	12.22
策略 3	10.51	9.10

6 结论

当三角形级联 SVG 用于单相负荷的电能质量 综合治理时,相电流指令具有多种组合。将指令电 流分为基波指令电流和谐波指令电流两部分。

a. 由于采用 H 桥级联形式的 SVG,为维持 H 桥 直流电容电压恒定,流过每相 SVG 的电流与其两端电 压必须保持在 90° 左右,因此,对于基波电流指令的 计算,只能采用基于电纳补偿原理的 Steinmetzs 理论。

b. 介绍了3种谐波指令电流的计算方案:单相 谐波全补偿策略、以环流等于0为约束原则的谐波 补偿策略、谐波均分补偿策略。

c. 从 SVG 每相电流有效值、SVG 中开关器件的 通态损耗、SVG 中开关器件的电流容量 3 个角度对 比了 3 种谐波指令电流的计算方案。

d. 单相谐波全补偿策略不能很好地利用 SVG 的谐波补偿能力,且通态损耗大,器件电流容量也 大;以环流等于0为约束原则的谐波补偿策略通态 损耗最小;谐波均分补偿策略所需的器件电流容量 最小。

e. 三角形 SVG 用于单相负荷的综合治理时,可 以根据工程设计要求适当选择谐波补偿策略,减少 损耗或减少设备容量。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军,等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社,1998.
- [2] 胡铭,陈珩.用户电力技术在配电系统的应用[J].电力自动化设备,1999,19(6):24-26.
 HU Ming,CHEN Heng. Application of custom power technology on power distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment,1999,19(6):24-26.
- [3] 范瑞祥,李政,赵刚,等.移动式 SVC 的设计及其在江西电网中的应用[J].电力系统自动化,2008,32(14):91-95.
 FAN Ruixiang,LI Zheng,ZHAO Gang,et al. The design of relocatable SVC and its application in Jiangxi Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(14):91-95.
- [4] 许胜,黄锦安,李雪. 一种基于 DSP 的动态无功补偿装置[J]. 电力电子技术,2006,40(1):104-105,114.
 XU Sheng,HUANG Jinan,LI Xue. Design of dynamic reactive power compensator based on DSP[J]. Power Electronics,2006,40(1):104-105,114.
- [5] AKAGI H,INOUE S,YOSHII T. Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration
 [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43 (4): 1041-1049.
- [6] 刘中元. 牵引变电站综合补偿方案的研究[D]. 郑州:郑州大学, 2004.

LIU Zhongyuan. Studies of the comprehensive compensation schemes for traction substations[D]. Zhengzhou;Zhengzhou University,2004.

- [7] 张定华,桂卫华,王卫安,等. 大型电弧炉无功补偿与谐波抑制的综合补偿系统[J]. 电网技术,2008,32(12):23-29.
 ZHANG Dinghua,GUI Weihua,WANG Weian, et al. Comprehensive compensation system combining reactive power compensation and harmonic suppression for large-scale electric arc-furnace[J]. Power System Technology,2008,32(12):23-29.
- [8] 朱红萍,罗隆福. 新型电气化铁道电能质量综合治理装置[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):72-76.
 ZHU Hongping,LUO Longfu. Power quality improving device for electric railroads[J]. Electric Power Automation Equipment,2011, 31(7):72-76.
- [9] 邱大强,李群湛,周福林,等. 基于背靠背 SVG 的电气化铁路电 能质量综合治理[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):36-44. QIU Daqiang,LI Qunzhan,ZHOU Fulin,et al. Comprehensive power quality control of electric railway based on back-to-back SVG [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):36-44.
- [10] 李群湛,贺建闽. 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术[J]. 电力系统自动化,1996,20(4):9-11.
 LI Qunzhan,HE Jianmin. Electrified railway feeding system without phase exchange and symmetrical compensation technology
 [J]. Automation of Electric Power Systems,1996,20(4):9-11.
- [11] 马晓军,臧克茂,姜齐荣,等.静止同步补偿器的分相不对称控制[J].中国电机工程学报,2001,21(1):52-56.
 MA Xiaojun,ZANG Kemao,JIANG Qirong, et al. Unbalanced control based on individual phase for static synchronous compensator[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(1):52-56.
- [12] 罗承廉,林烽,刘遵义,等. 基于链式 STATCOM 的三相不平衡 负载的平衡化补偿[J]. 继电器,2003,31(10):5-8.
 LUO Chenglian,LIN Feng,LIU Zunyi, et al. Balancing compensation

of 3-Ph unbalanced load with cascade inverters based STATCOM [J]. Relay,2003,31(10):5-8.

[13] 何爽. 不平衡工况下链式 STATCOM 的控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学,2011.

HE Shuang. Research on the control strategy for cascade multilevel STATCOM under unbalanced condition [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2011.

- [14] 谭树龙,杨耕,耿华.不平衡工况下链式 STATCOM 的运行极限 分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):44-49,78.
 TAN Shulong,YANG Geng,GENG Hua. Analysis of operating limit for cascaded STATCOM in unbalanced condition[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):44-49,78.
- [15] 熊桥坡,罗安,何志兴,等. 角形链式 SVG 零序环流推导及电流 指令获取[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):75-79,96.
 XIONG Qiaopo,LUO An,HE Zhixing,et al. Derivation of zerosequence circulating current and detection of reference current for cascaded SVG with delta configuration[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):75-79,96.
- [16] HAGIWARA M, MAEDA R, AKAGI H. Negative-sequence reactive-power control by a PWM STATCOM based on a modular multilevel cascade converter (MMCC-SDBC) [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2):720-729.
- [17] 许湘莲. 基于级联多电平逆变器的 STATCOM 及其控制策略研 究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.

XU Xianglian. Research on cascaded multilevel inverter based STATCOM and its control[D]. Wuhan;Huazhong University of Science and Technology, 2006.

[18] 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 currents

for D-STATCOM used for unbalanced load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1):75-79.

[19] 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. Optional design of compensation currents for D-STATCOM used for unbalanced load[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(8): 65-70.

作者简介:



王宝安(1978—),男,江苏扬州人,副教 授,博士,主要研究方向为电能质量、电力电 子技术(E-mail:wbaseu@seu.edu.cn);

陈 豪(1989—),男,山东威海人,硕士

研究生,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用 (E-mail:chenhao9989@126.com)。

Phase-current reference calculation for SVG used in comprehensive management of single-phase load power quality

WANG Baoan, SHANG Jiao, CHEN Hao

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The calculating methods of phase-current reference for the delta-connected SVG(Static Var Generator) used in the single-phase load power quality management are researched. The phase-current reference is divided into the fundamental-current reference and the harmonic-current reference. The fundamental current is calculated based on the Steinmetzs theory while the harmonic current may be obtained by three harmonic compensation strategies; single-phase complete compensation, zero-circulating-current constrained compensation and evenly distributed harmonic compensation. The phase-current RMS, the on-state loss of switching device and the current capacity of switching device are compared among three strategies. A simulation model of low-voltage seven-level SVG is established in PSCAD and a low-voltage prototype is built. The simulative and experimental results validate the correctness of the introduced phase-current reference calculating methods.

Key words: SVG; delta-connection; single-phase load; power quality; current reference; harmonic distribution; harmonic analysis; calculation

```
第36卷
```

64