

角形链式 SVG 零序环流推导及电流指令获取

熊桥坡, 罗 安, 何志兴, 马伏军

(湖南大学 国家电能变换与控制工程技术研究中心, 湖南 长沙 410082)

摘要: 在已知线电流负序分量的前提下, 对角形链式静止无功发生器(SVG)零序环流进行了推导, 进而提出基于瞬时功率理论的零序环流计算方法。针对角形链式 SVG 相电流指令信号获取难题, 提出一种由零序环流与线电流指令叠加产生相电流指令的方法, 所需零序环流和线电流指令根据瞬时功率理论分别计算获得。该方法可与现有的单相链式 SVG 控制策略结合, 实现角形链式 SVG 综合补偿功能。在 PSIM 仿真环境下搭建了链式 SVG 仿真模型, 仿真结果表明, 采用所提相电流指令获取方法可实现角形链式 SVG 综合补偿功能, 且在负载变化时具有较快的响应速度。

关键词: SVG; 链式 SVG; 角形连接; 零序环流; 相量分析; 指令信号获取方法; 补偿; 瞬时功率理论

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.012

0 引言

配电网中的非线性负载产生大量无功、负序和谐波电流, 造成电力系统电能损失, 威胁系统安全运行^[1-3]。链式静止无功发生器 SVG(Static Var Generator)具有模块化、易扩展的优点, 在中高压配电网电能质量治理领域具有较好的应用前景^[4-7]。

Hirofumi Akagi 在文献[8]中对级联型多电平变换器进行了系统的分类, 指出三角形连接的链式 SVG 具有负序补偿功能, 并在文献[9]中深入研究了角形链式 SVG 对负序无功功率的补偿。彭方正教授在文献[10]中阐述了角形链式 SVG 负序补偿原理, 给出了基于 Steinmetz 原理的电流指令检测方法, 计算出各补偿支路的电纳, 实现了无功和负序电流的补偿, 但未考虑谐波电流的补偿。文献[11-14]研究了级联型多电平变换器对谐波电流的补偿, 取得了良好的效果。角形链式 SVG 已成功应用于无功、负序和谐波电流的补偿, 但鲜有文献考虑其对无功、负序和谐波电流进行综合补偿。补偿电纳计算方法^[15]制约着角形链式 SVG 的补偿功能和响应速度, 角形链式 SVG 进行综合补偿所需的电流指令的获取仍待进一步研究。文献[16]中推导出 dq/Δ 变换矩阵, 并应用该矩阵进行了综合补偿电流指令的提取。但所提综合补偿电流指令获取方法中含有较多的坐标变换环节, 仍待进一步简化。

本文首先对补偿器线电流与角内相电流的关系

进行分析, 角内零序环流可改变相电流基波分量的相角, 使相电流相量与线电压垂直。在已知线电流负序分量的前提下进行相量分析, 得到零序分量的相量表达式; 进而, 提出基于瞬时功率理论的零序环流计算方法。针对角形补偿器相电流指令信号获取的难题, 从计算相电流零序分量的角度出发, 提出一种适用于角形链式 SVG 的指令信号获取方法, 可获取无功、负序和谐波电流综合补偿所需的相电流指令信号。最后将所提指令信号获取方法与现有的单相链式 SVG 控制策略结合, 并进行了仿真实验。

1 补偿器工作原理

图 1 为在三相三线系统中角形链式 SVG 接线示意图, 补偿器采用级联型多电平拓扑构成每相链节。图中, i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 为网侧电流; i_{la}, i_{lb}, i_{lc} 为负载电流; i_a, i_b, i_c 为补偿器线电流; i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} 为补偿器相电流。角形补偿器可对无功、负序和谐波电流进行综合补偿, 线电流指令信号 i_a^*, i_b^*, i_c^* 表示如下:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_q^+ \sin(\omega t + \pi/2) \\ I_q^+ \sin(\omega t - \pi/6) \\ I_q^+ \sin(\omega t + 7\pi/6) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I \sin(\omega t + \theta^-) \\ I \sin(\omega t + 2\pi/3 + \theta^-) \\ I \sin(\omega t - 2\pi/3 + \theta^-) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, I_q^+ 为基波正序无功分量的幅值; I 为基波负序分量的幅值; θ^- 为基波负序分量的初始相角; i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 为谐波分量。线电流指令信号可通过 $i_p - i_q$ 法检测获得。

角形补偿器通过分相调节每相链节输出电压可独立控制角内相电流 i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} 。补偿器常以相电流为控制量进行电流跟踪控制, 相电流与线电流的转换关系如下:

收稿日期: 2014-08-12; 修回日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51237003); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A301); 湖南省研究生科研创新项目(CX2012A006)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(51237003), the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A301) and Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate(CX2012A006)

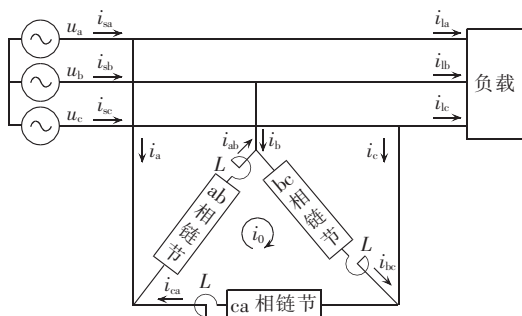


图 1 角形链式 SVG 的示意图

Fig.1 Schematic diagram of cascaded SVG with delta configuration

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ab}^* \\ i_{bc}^* \\ i_{ca}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

上述转换矩阵非满秩,已知线电流求取相电流存在多组解。引入补偿器角内零序环流的约束条件:

$$i_{ab}^* + i_{bc}^* + i_{ca}^* = 3i_0^* \quad (3)$$

可得相电流指令信号 i_{ab}^* 、 i_{bc}^* 、 i_{ca}^* 的唯一解为:

$$\begin{bmatrix} i_{ab}^* \\ i_{bc}^* \\ i_{ca}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & -1/3 & 0 \\ 0 & 1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 0 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_0^* \\ i_0^* \\ i_0^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

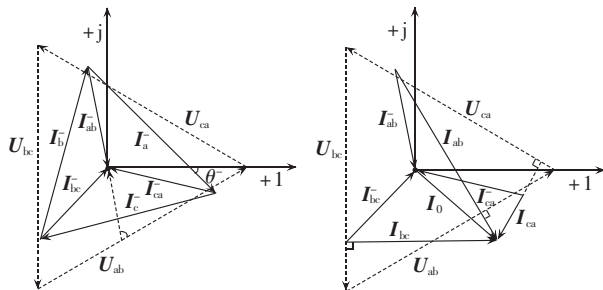
由式(4)可知,已知线电流指令信号 i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 和零序环流指令信号 i_0^* ,便可求得相电流指令信号。

将式(1)代入式(4),可将相电流指令信号分解如下:

$$\begin{bmatrix} i_{ab}^* \\ i_{bc}^* \\ i_{ca}^* \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{\sqrt{3}}{3} \begin{bmatrix} I_q^+ \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ I_q^+ \sin(\omega t) \\ I_q^+ \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{bmatrix}}_{\text{基波正序分量}} + \underbrace{\frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_{ab} - i_{bh} \\ i_{bh} - i_{ch} \\ i_{ch} - i_{ah} \end{bmatrix}}_{\text{谐波分量}} + \underbrace{\frac{\sqrt{3}}{3} \begin{bmatrix} I^- \sin(\omega t - \pi/6 + \theta^-) \\ I^- \sin(\omega t + \pi/2 + \theta^-) \\ I^- \sin(\omega t - 5\pi/6 + \theta^-) \end{bmatrix}}_{\text{基波负序分量}} + \underbrace{\begin{bmatrix} i_0^* \\ i_0^* \\ i_0^* \end{bmatrix}}_{\text{零序分量}} \quad (5)$$

补偿器相电流由基波正序无功分量、谐波分量、基波负序分量和零序分量四部分组成,其中,基波正序无功分量、谐波分量、基波负序分量由线电流指令信号决定。

链式 SVG 直流侧相互独立,采用电容起电压支撑作用。基波正序无功分量、谐波分量并不影响链节与电网的有功功率交换。负序补偿相量图如图 2 所示,线电流的负序分量为 I_a^- 、 I_b^- 、 I_c^- ,相电流的负序分量为 I_{ab}^- 、 I_{bc}^- 、 I_{ca}^- ,零序分量为 I_0 ,叠加零序分量后的相电流为 I_{ab} 、 I_{bc} 、 I_{ca} 。相电流的负序分量 I_{ab}^- 、 I_{bc}^- 、 I_{ca}^- 与线电压相量 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 非正交,将导致某些相的链节从电网输入有功功率,直流侧电容电压持续升高,其他相的链节向电网输出有功功率,直流侧电容电



(a) 叠加零序分量前

(b) 叠加零序分量后

图 2 负序补偿相量图

Fig.2 Phasor diagrams of negative-sequence compensation

压持续下降。零序分量 I_0 与三相线电压相互作用,可实现相间有功功率的传输,将某相链节从电网获得的有功功率向其他相链节转移。

从功率传输的角度看,负序分量将有功功率从电网输入到某相链节,经零序分量作用将输入的有功功率传输到其他相链节,并由于负序分量的作用从其他相链节传回电网,最终实现电网有功功率在相间的传输。在功率传输的过程中,各相链节为电网有功功率在相间的传输提供了通道,总体看来,各相链节的能量并未增加或减少,电容电压将维持稳定。从相量分析的角度看,引入零序环流,在不影响线电流的前提下,可改变角内相电流基波分量的相角,选择合适的零序分量,可使相电流相量 I_{ab} 、 I_{bc} 、 I_{ca} 分别与线电压 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 垂直,从而维持各相链节直流侧电容电压的稳定。

2 零序环流的推导

基于 Steinmetz 原理的检测方法侧重于对补偿电纳的求解,忽略了对零序环流的研究。本节将在已知线电流指令信号中基波负序分量的前提下进行相电流零序环流的推导,并给出基于瞬时功率理论的零序环流计算方法,为第 3 节所提指令信号获取方法提供理论依据。

2.1 零序环流的相量求解

假设电网电压三相对称,线电压相量 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 分别为:

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} U_s + j \frac{U_s}{2} \\ -j U_s \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} U_s + j \frac{U_s}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, U_s 为线电压的幅值。

线电流指令信号中负序分量 I_a^- 、 I_b^- 、 I_c^- 为:

$$\begin{bmatrix} I_a^- \\ I_b^- \\ I_c^- \end{bmatrix} = I^- \begin{bmatrix} \cos \theta^- + j \sin \theta^- \\ \cos(\theta^- + 2\pi/3) + j \sin(\theta^- + 2\pi/3) \\ \cos(\theta^- - 2\pi/3) + j \sin(\theta^- - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(4)、(5)可知,相电流指令信号中负序分量 I_{ab}^- 、 I_{bc}^- 、 I_{ca}^- 分别为:

$$\begin{bmatrix} I_{ab}^- \\ I_{bc}^- \\ I_{ca}^- \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}I^-}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta^- - \pi/6) + j\sin(\theta^- - \pi/6) \\ \cos(\theta^- + \pi/2) + j\sin(\theta^- + \pi/2) \\ \cos(\theta^- - 5\pi/6) + j\sin(\theta^- - 5\pi/6) \end{bmatrix} \quad (8)$$

令零序分量 I_0 为:

$$I_0 = X + jY \quad (9)$$

相电流指令信号中的负序分量与零序分量叠加得到相量 I_{ab} 、 I_{bc} 、 I_{ca} :

$$\begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}I^-}{3} \cos(\theta^- - \pi/6) + X \\ \frac{\sqrt{3}I^-}{3} \cos(\theta^- + \pi/2) + X \\ \frac{\sqrt{3}I^-}{3} \cos(\theta^- - 5\pi/6) + X \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}I^-}{3} \sin(\theta^- - \pi/6) + Y \\ \frac{\sqrt{3}I^-}{3} \sin(\theta^- + \pi/2) + Y \\ \frac{\sqrt{3}I^-}{3} \sin(\theta^- - 5\pi/6) + Y \end{bmatrix} \quad (10)$$

选择合适的零序分量,可使相量 I_{ab} 、 I_{bc} 、 I_{ca} 与线电压 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 垂直,即:

$$\begin{cases} I_{ab} \perp U_{ab} \\ I_{bc} \perp U_{bc} \\ I_{ca} \perp U_{ca} \end{cases} \quad (11)$$

根据相量垂直的条件,可得以下方程:

$$\begin{cases} \left[\frac{\sqrt{3}I^-}{3} \cos(\theta^- - \frac{\pi}{6}) + X \right] \times \frac{\sqrt{3}}{2} U_s + \left[\frac{\sqrt{3}I^-}{3} \sin(\theta^- - \frac{\pi}{6}) + Y \right] \times \frac{U_s}{2} = 0 \\ \left[\frac{\sqrt{3}I^-}{3} \sin(\theta^- + \frac{\pi}{2}) + Y \right] \times U_s = 0 \\ - \left[\frac{\sqrt{3}I^-}{3} \cos(\theta^- - \frac{5\pi}{6}) + X \right] \times \frac{\sqrt{3}}{2} U_s + \left[\frac{\sqrt{3}I^-}{3} \sin(\theta^- - \frac{5\pi}{6}) + Y \right] \times \frac{U_s}{2} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

求解可得零序分量的相量坐标为:

$$\begin{cases} X = \frac{-I^- \sin \theta^-}{\sqrt{3}} \\ Y = \frac{-I^- \cos \theta^-}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (13)$$

零序分量的相量表达式如下:

$$I_0 = \frac{-I^- \sin \theta^- - jI^- \cos \theta^-}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

2.2 基于瞬时功率理论的零序环流计算方法

根据瞬时功率理论,将 abc/dq 变换矩阵 $C_{abc/dq}$ 中的第 2 列与第 3 列对调,得到新矩阵 $C'_{abc/dq}$ 。三相

负载电流 i_{la} 、 i_{lb} 、 i_{lc} 经矩阵变换,可得 i_p^n 、 i_q^n [2]:

$$\begin{bmatrix} i_p^n \\ i_q^n \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t + 2\pi/3) & \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t + 2\pi/3) & \cos(\omega t - 2\pi/3) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{la} & i_{lb} & i_{lc} \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

i_p^n 、 i_q^n 中含有由负载基波负序电流引起的直流分量、基波正序电流引起的 2 倍频波动及谐波电流引起的高频波动。滤波器可采用中心频率为 100 Hz 的二阶带阻滤波器和截止频率为 200 Hz 的二阶低通滤波器串联组成,带阻滤波器用于滤除基波正序电流引起的 2 倍频波动,低通滤波器用于滤除谐波电流引起的高频波动。经滤波后,可得到基波负序有功分量 I_p^n 和基波负序无功分量 I_q^n 。为消除网侧电流中的基波负序电流,补偿器需提供与负载相反的负序电流,则 I_p^n 、 I_q^n 与线电流指令信号中负序电流幅值 I^- 和初相角 θ^- 的关系如下:

$$\begin{bmatrix} I_p^n \\ I_q^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I^- \cos \theta^- \\ -I^- \sin \theta^- \end{bmatrix} \quad (16)$$

代入式(14),可得:

$$I_0 = \frac{I_q^n + jI_p^n}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

零序环流的瞬时值 i_0^* 为:

$$i_0^* = \frac{\sqrt{3}}{3} [I_q^n \sin(\omega t) + I_p^n \cos(\omega t)] \quad (18)$$

综上所述,基于瞬时功率理论的零序环流快速计算方法如下:检测负载电流 i_{la} 、 i_{lb} 、 i_{lc} ,利用瞬时功率理论计算 i_p^n 、 i_q^n ;经滤波得到基波负序有功分量 I_p^n 和基波负序无功分量 I_q^n ,根据式(18)可得到零序环流指令信号的瞬时值 i_0^* 。

3 相电流指令信号的获取

从计算相电流零序分量的角度出发,提出了一种适用于角形链式 SVG 的相电流指令信号获取方法,如图 3 所示。

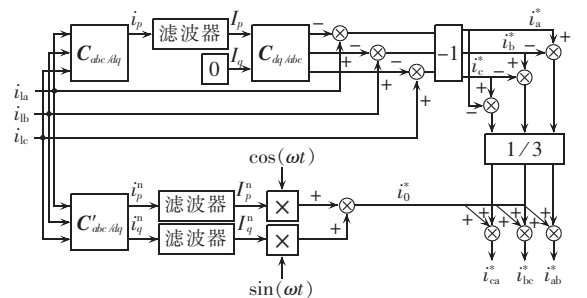


图 3 相电流指令信号获取原理图

Fig.3 Schematic diagram of reference current generation

a. 利用瞬时功率理论检测得到补偿器线电流指令信号 i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 。采集负载电流的瞬时值 i_{la} 、 i_{lb} 、 i_{lc} ,采用 $i_p - i_q$ 检测法,得到负载电流基波有功分量;负载电流减去基波有功分量,得到负载电流基波无功分

量、基波负序分量和谐波分量;取反,得到补偿器线电流指令信号 i_a^*, i_b^*, i_c^* 。

b. 根据 2.2 节所述方法计算获取相电流零序分量的指令信号 i_0^* 。

c. 将线电流指令信号 i_a^*, i_b^*, i_c^* 和相电流零序分量的指令信号 i_0^* 代入式(4),便可得到相电流指令信号 $i_{ab}^*, i_{bc}^*, i_{ca}^*$ 。

文献[17]详述了单相链式 SVG 的主从控制策略:主控制器进行直流侧电压总体控制和电流跟踪控制;从控制器完成直流侧电压平衡控制和载波移相调制。将所提相电流指令信号获取方法与现有的单相 SVG 控制策略结合,可实现对非线性负荷无功、负序和谐波电流的综合补偿。

4 仿真实验

为验证本文所提指令信号获取方法的有效性,在 PSIM 环境下搭建了角形五电平链式 SVG 仿真模型,主要仿真参数如下:电网线电压有效值为 380 V,级联数为 2,载波频率为 5 kHz,直流侧电容为 20 mF,连接电抗为 1 mH,级联单元直流侧电压参考值为 300 V。第 1 组负载为连接于 ab 相间的单相阻性负荷, $R_1=4\ \Omega$;第 2 组负载为三相不可控整流电路带阻感负载, $L_d=5\text{ mH}$, $R_d=20\ \Omega$ 。

工况 1,投入第 1 组负载进行仿真。负载电流波形如图 4(a)所示,三相不对称,a、b 相电流相位相差 180° ,此时三相不平衡度为 100%。由 i_p-i_q 检测法获得的补偿器线电流指令信号波形如图 4(b)所示, i_a^*, i_b^*, i_c^* 呈负序排列。采用本文所提零序环流计算方法所得指令信号如图 4(c)所示,环流的有效值为 31.6 A。将线电流指令信号 i_a^*, i_b^*, i_c^* 和相电流零序分量指令信号 i_0^* 代入式(4),得到相电流指令信号 $i_{ab}^*, i_{bc}^*, i_{ca}^*$ 如图 4(d)所示。补偿器直流侧电压总体控制采用 PI 调节器,比例参数 $P_1=1$,积分时间常数 $T_1=0.1\text{ s}$;电流跟踪控制采用比例调节,比例参数 $P_2=10$;直流侧电压平衡控制采用比例调节,比例参数 $P_3=0.01$ 。补偿器输出电压如图 4(e)所示,为典型的五电平信号。补偿器实际输出电流波形如图 4(f)所示,较好地跟踪了电流指令信号。补偿后的网侧电流波形如图 4(g)所示,三相电流对称,接近正弦波。

2 s 时投入第 2 组负载,进入工况 2。负载电流变化情况如图 5(a)所示,补偿器迅速响应负载变化,输出电流变化情况如图 5(b)所示。网侧电流经过短暂调节,很快又重新稳定,变化情况如图 5(c)所示。整流电路负载电流在换相时突变,受 SVG 响应速度的影响,补偿电流需延时一段时间才能跟踪上,从而导致网侧电流在换相时出现毛刺。在负载变化

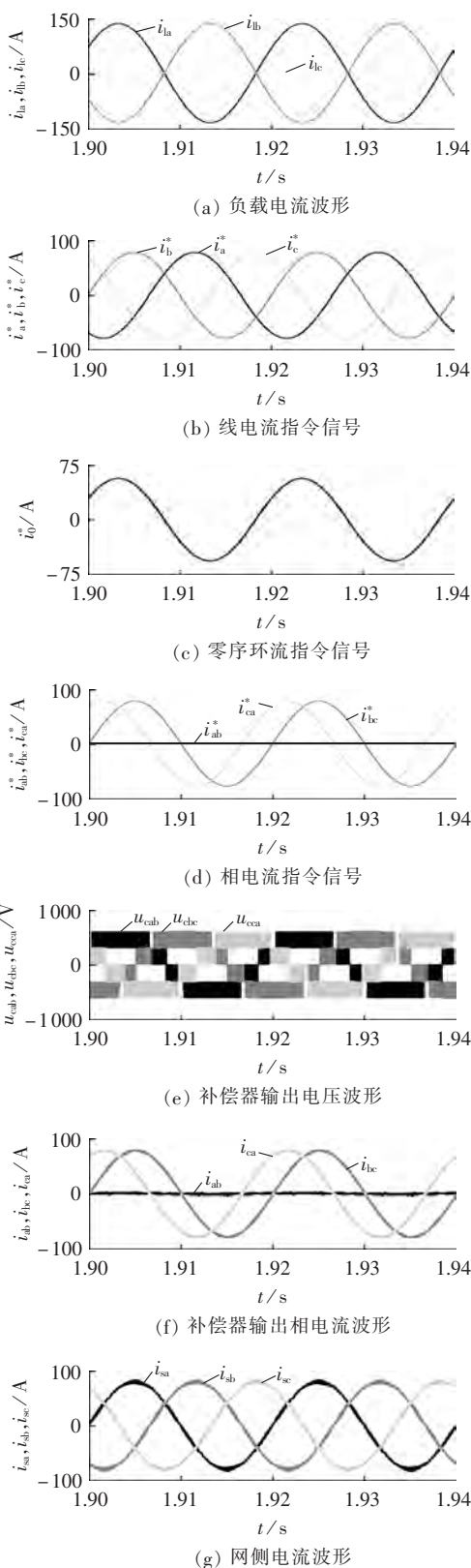


图 4 工况 1 仿真波形

Fig.4 Simulative waveforms of case 1

过程中,直流侧电压始终维持稳定,且相互平衡,如图 5(d)所示。

仿真结果表明将所提相电流指令信号获取方法与现有的单相 SVG 控制策略结合,可实现角形链式

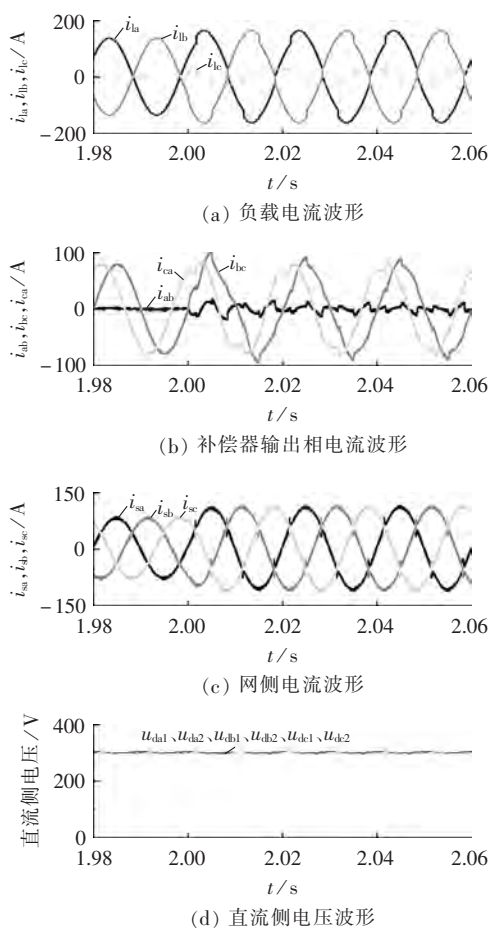


图 5 负载变化时的仿真波形

Fig.5 Simulative waveforms during load change

SVG 综合补偿功能,且在负载变化时具有较快的响应速度。

5 结论

分析了角形链式 SVG 线电流与角内相电流的关系,从功率传输和相量分析 2 个角度阐述了零序环流在负序补偿时所起的作用。在已知线电流负序分量的前提下,进行了零序环流的相量求解;并提出了基于瞬时功率理论的零序环流计算方法。针对角形补偿器相电流指令信号获取的难题,从计算相电流零序分量的角度出发,提出了一种适用于角形链式 SVG 的指令信号获取方法,可获取无功、负序和谐波电流综合补偿所需的相电流指令信号。仿真结果表明,在负载变化时所提方法具有较快的响应速度。

参考文献:

- [1] 林海雪. 电力系统的三相不平衡[M]. 北京:中国电力出版社, 1998:19-32.
- [2] 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,2005:1-9.
- [3] 罗安,吴传平,彭双剑. 谐波治理技术现状及其发展[J]. 大功率变流技术,2011(6):1-5.

LUO An,WU Chuanping,PENG Shuangjian. State of harmonic compensation technology and its development[J]. High Power Converter Technology,2011(6):1-5.

- [4] 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.
- [5] 赵香花,陈远华,刘文华,等. 一种星链接式 STATCOM 不平衡补偿的新拓扑[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):108-113.
- ZHAO Xianghua,CHEN Yuanhua,LIU Wenhua,et al. New topology for unbalance compensation of cascaded STATCOM with star configuration[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):108-113.
- [6] 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.
- [7] ATALIK T,DENIZ M,GERÇEK C Ö,et al. Multi-DSP and -FPGA-based fully digital control system for cascaded multilevel converters used in FACTS applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2012,48(3):511-527.
- [8] AKAGI H. Classification,terminology,and application of the Modular Multilevel Cascade Converter(MMCC)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(11):3119-3130.
- [9] 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.
- [10] PENG Fangzheng,WANG Jin. A universal STATCOM with delta-connected cascade multilevel inverter[C]//2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen,Germany:IEEE,2004:3529-3533.
- [11] CHEN Zhong,LUO Yingpeng,LUO Yingpeng. Control and performance of a cascaded shunt active power filter for aircraft electric power system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2012,59(9):3614-3623.
- [12] 李建林,张仲超,许洪华,等. 基于级联 H 桥五电平变流器 SAPF 的应用研究[J]. 电工技术学报,2006,21(2):79-82.
- LI Jianlin,ZHANG Zhongchao,XU Honghua,et al. Research on SAPF based on cascade H bridge five-level converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(2):79-82.
- [13] 戴珂,陈睿,黄云辉,等. 配电系统级联多电平有源电力滤波器仿真研究[J]. 高压电器,2011,47(4):28-32,36.
- DAI Ke,CHEN Rui,HUANG Yunhui,et al. Simulation research on cascaded multilevel active power filter for distribution network[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(4):28-32,36.
- [14] 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.
- LI Jianlin. Cascade H-bridge multilevel converter with carrier phase-shifted SPWM technique and its application to active power filter[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2005.
- [15] MILLER T J E. Reactive power control in electric system[M]. New York,USA:John Wiley & Sons,1982:44-53.

(下转第 96 页 continued on page 96)

线损方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 86-89.

XU Ruzhi, WANG Yufei. Theoretical line loss calculation based on SVR and PSO for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 86-89.

[21] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.

[22] KENNEDY J. Bare bones particle swarms[C]//Proceedings of IEEE Swarm Intelligence Symposium. Indiana, USA: IEEE, 2003: 80-87.

作者简介:



王攀攀

王攀攀(1982—), 男, 浙江东阳人, 讲师, 博士, 主要从事感应电机故障诊断及智能优化研究(E-mail: wpp2011@126.com);

史丽萍(1964—), 女, 江苏溧阳人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事电气设备故障诊断、智能优化及人工智能研究。

Positive and negative sequence phasor extraction by particle swarm optimization algorithm for induction motor stator fault detection

WANG Panpan, SHI Liping

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: As the fault characteristic components of broken rotor bar, harmonics and noise in stator current influence the fault diagnosis of induction motor stator, a fault detection method is proposed, which applies BBPSO(Bare-Bones Particle Swarm Optimization) algorithm to extract the positive and negative sequence phasors. The total negative sequence current is calculated directly according to the fundamental amplitude and phase of three phase stator currents extracted by BBPSO. As the negative sequence currents of an actual motor are normally effected by the unbalanced power supply voltages, inherent asymmetry and load variation, equivalent negative sequence impedance and support vector machine are applied to remove these influencing factors and the obtained residual negative sequence current caused by the stator fault alone is used for fault detection. The results of laboratory experiments demonstrate that, the proposed method applying the extracted residual negative sequence current for stator fault detection is more accurate.

Key words: induction motors; stators; stator fault; bare-bones particle swarm optimization algorithm; negative sequence current; fault detection; support vector machines

(上接第 79 页 continued from page 79)

[16] 熊桥坡, 罗安, 马伏军, 等. 考虑负序补偿的角型链式 SVG 指令电流提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 12-19.

XIONG Qiaopo, LUO An, MA Fujun, et al. A reference current detection method of delta-connected cascaded SVG considering unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 12-19.

[17] YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DU Yan, et al. Research on master-slave control strategy of capacitor voltage for cascade STATCOM [C]//DRPT2008. Nanjing, China: [s.n.], 2008: 1620-1624.

作者简介:



熊桥坡

熊桥坡(1988—), 男, 江西南昌人, 博士, 主要从事 FACTS 技术研究和电力电子装置的研制(E-mail: xiongqiaopo@sina.com);

罗安(1957—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事谐波治理和无功补偿关键技术、大型工业企业电气节能新技术等方面的教学与科研工作(E-mail: an_luo@126.com)。

Derivation of zero-sequence circulating current and detection of reference current for cascaded SVG with delta configuration

XIONG Qiaopo, LUO An, HE Zhixing, MA Fujun

(National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The zero-sequence circulating current of cascaded SVG(Static Var Generator) with delta configuration is derived from the premise that the negative-sequence component of line current is known and its calculation method based on the instantaneous power theory is then proposed. As it is difficult to acquire the reference phase current of cascaded SVG with delta configuration, a method is proposed to generate it by superposing the zero-sequence circulating current on the reference line current. The zero-sequence circulating current and reference line current are calculated based on the instantaneous power theory. Combined with the existing control strategy of single-phase cascaded SVG, the proposed method can be applied to achieve the comprehensive compensation of cascaded SVG with delta configuration. A cascaded SVG model is built in PSIM simulation environment and the simulative results show that, the comprehensive compensation of cascaded SVG with delta configuration is realized by the proposed method, with quicker response to load change.

Key words: SVG; cascaded SVG; delta-configuration; zero-sequence circulating current; phasor analysis; reference current detection method; compensation; instantaneous power theory