

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L70726

# 基于协调控制 SVG 的低压配网 三相负荷不平衡治理技术

邓惠华<sup>1</sup> 李国良<sup>1</sup> 周晓明<sup>1</sup> 李汉荣<sup>1</sup> 王浩<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局 惠州 516001

2. 中国科学院广州能源研究所 广州 510640)

**摘要** 针对集中式静止无功发生器 (SVG) 补偿系统补偿效果单一、不含通信功能的分布式 SVG 补偿系统补偿容量不能智能分配的问题, 提出基于协调控制 SVG 的低压配网三相负荷不平衡补偿系统。该补偿系统引入通信总线, 采用协调控制方法, 使低压线路下游接入的 SVG 可利用补偿其下游不平衡电流后的剩余容量, 依次对上游 SVG 不足容量进行补偿, 该补偿形成的逆向潮流可进一步减轻各节点的低电压问题。该补偿系统既可以充分利用各 SVG 的补偿容量, 同时也综合地解决了配电变压器电流不平衡、节点低电压等问题。在 Matlab/Simulink 数字仿真软件下进行了该补偿系统补偿效果的仿真, 结果证明了该补偿系统的准确性。在四种不同负荷情况下比较采用四种不同补偿系统的低压配网配电变压器二次侧不平衡电流和各节点电压降, 结果表明该补偿系统的效果最佳。

**关键词:** 低压配网 三相负荷不平衡 配电变压器运行 协调控制 静止无功发生器 电能质量

中图分类号: TM761

## The Control Technology of Three-Phase Unbalance Load in Low Voltage Distribution Networks Based on Coordinated Controlled SVGs

Deng Huihua<sup>1</sup> Li Guoliang<sup>1</sup> Zhou Xiaoming<sup>1</sup> Li Hanrong<sup>1</sup> Wang Hao<sup>2</sup>

(1. Huizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd Huizhou 516001 China  
2. Guangzhou Institute of Energy Conversion Chinese Academy of Sciences Guangzhou 510640 China)

**Abstract** Concentrated static var generator (SVG) compensation system has single compensation effect and distributed SVG compensation system without communication function can not distribute SVG's compensation capacities intelligently. Aiming at these problems, a compensation system based on SVGs' coordinated control strategy was proposed for three-phase unbalance load in low voltage distribution network. Communication bus and coordinated control strategy are introduced in the proposed system. After compensating the downstream unbalance current, the residual capacity of the downstream SVG is used to compensate the upstream SVGs in sequence. The low voltage problem of each node is further reduced by the reverse power flows from the downstream SVG to the upstream SVG. And then SVG's capacity in the proposed compensation system can be fully used. Meanwhile, the problems of the distribution transformer's unbalance current and the node's low voltage are synthetically solved. Simulations for actual effect evaluation of the proposed compensation system were done in Matlab/Simulink. Validity of the proposed system is confirmed by the simulation. In four different load cases, four different compensation systems were applied in low voltage distribution

广东省自然科学基金 (2014A030310191) 和广东省省级科技计划 (2014B040404002) 资助项目。

收稿日期 2016-08-12 改稿日期 2016-12-01

station, respectively. Unbalance currents of distribution transformer secondary and node voltage drops in these cases were compared. Comparison results show that proposed compensation system has the best compensation effect.

**Keywords:** Low voltage distribution networks, three-phase load unbalance, distribution transformer operation, coordinated control, static var generator (SVG), power quality

## 0 引言

随着配网用户对用电质量要求的不断提高, 国家各大电网公司对低压配网的电能质量问题日益重视, 近年来低压配网的电能质量治理成为重点工作, 其中有关三相负荷不平衡的危害分析及治理已成为关注的重要研究课题之一。

低压配网存在大量的单相负荷, 负荷特征复杂、用电同时率低等特点导致的三相负荷不平衡问题呈现长期性特征<sup>[1-3]</sup>。三相负荷不平衡可造成配电变压器处于不平衡运行状态, 导致配电变压器损耗增大、局部温升较大, 从而缩短变压器使用寿命<sup>[4,5]</sup>; 可造成低压线路中性点电位偏移、压降和功率损耗增大, 导致部分用户电压偏低和电网损耗增大; 可造成用电设备不能正常工作等问题<sup>[3,4]</sup>。

现有的低压配网三相负荷不平衡治理措施主要包括人工调整换相、智能换相和采用无源/有源补偿装置三种方式<sup>[1, 6-19]</sup>。相比于其他两种措施, 采用无源/有源补偿装置<sup>[6-19]</sup>适用于配网用户负荷分散的场合, 具有动态均衡三相负荷电流、无短时断电问题和使用寿命远超换相装置等优点。静止无功发生器 (Static Var Generator, SVG) 是有源三相不平衡负荷补偿装置, 采用电力电子开关器件, 具有远高于无源补偿装置的调节速度和开关寿命, 解决低压配网三相负荷不平衡带来的电能质量问题效果最佳。

本文研究的 SVG 采用分布式接入方法。因 SVG 只能平衡其并联接入点上游线路的电流、线损和上游节点低电压, 故采用集中式接入方法在低压配网线路首端或中段接入 SVG 不能同时兼顾平衡三相电流、减少线损和消除节点低电压。若采用分布式接入方式, 在低压配网多个节点分别接入 SVG, 则可在平衡各节点三相电流的同时, 减少线损和消除节点低电压。

分布式接入 SVG 补偿系统中, 若多个 SVG 之间无通信, SVG 采用独立补偿的控制策略, 则各 SVG 的容量仅能用于补偿下游不平衡电流。因此, 当低压配网负荷变化较大时多个 SVG 的设计容量难以确定, 在补偿系统运行时存在部分 SVG 容量不

够和部分 SVG 容量过剩的现象。本文在分布式接入 SVG 补偿系统的基础上, 增加 SVG 之间的通信总线, 并提出 SVG 协调控制方法。基于该协调控制方法, 下游 SVG 可利用其补偿下游不平衡电流后剩余容量, 根据通信获取的上游 SVG 不足容量及距离, 依次对上游 SVG 进行补偿。该补偿系统可充分利用各 SVG 的容量, 同时下游 SVG 对上游 SVG 不足容量的补偿形成逆向潮流, 可进一步减轻各节点的低电压问题。在 SVG 控制算法中, 直流电压环、负序电流环和零序电流环等控制环的实现及补偿容量的计算均采用 dq 变换, 有效提高了 SVG 的补偿速度及各 SVG 的协调控制速度。

为验证所提补偿系统的优点及正确性, 本文基于 Matlab/Simulink 数字仿真软件对所提补偿系统进行了三相不平衡负荷补偿效果的仿真证明; 随后, 基于理论计算给出了不同补偿系统在不同三相负荷不平衡情况下低压配网配电变压器二次侧不平衡电流和各节点电压降的对比。

## 1 系统结构

本文提出基于协调控制 SVG 的补偿系统, 可对低压配网中因三相负荷不平衡带来的问题进行综合治理。图 1 为该补偿系统在低压线路应用的示意图, 其中补偿系统的结构如点划线框中所示。

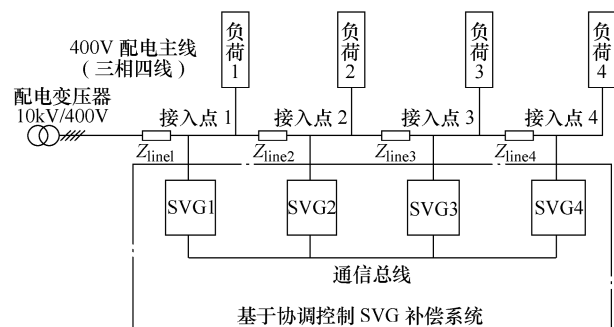


图 1 基于协调控制 SVG 的补偿系统示意图

Fig.1 Diagram of SVG compensation system based on coordinated control

图 1 中, 10kV/400V 配电变压器将中压馈线的 10kV 电压转换为 400V, 其二次侧与 400V 低压配网线路首端连接; 该低压线路选择 4 个节点为 SVG

补偿系统的接入点，分别定义为接入点 1~接入点 4；接入点之间的负荷集总并定义为为负荷 1~负荷 4；接入点之间的线路阻抗集总并定义为  $Z_{line1} \sim Z_{line4}$ ；SVG 补偿系统采用分布式接入方式，4 个 SVG (SVG1~SVG4) 分别并联接入到接入点 1~接入点 4；各 SVG 均连接到通信总线，通过该总线与其他 SVG 交互协调控制所需信息。

SVG 拓扑结构如图 2 所示，采用分裂电容式变换器拓扑，其直流侧含两个串接的电容和三个桥臂，逆变输出端为三相四线（出线端分别为三相桥臂的中点和直流侧两个电容的中点），经 LCL 滤波电路后并接入低压配网线路，可吸收接入点下游负荷的不平衡电流（负序和零序分量）。图 2 中  $U_{dc1}$  和  $U_{dc2}$  分别为直流侧上、下电容的电压。

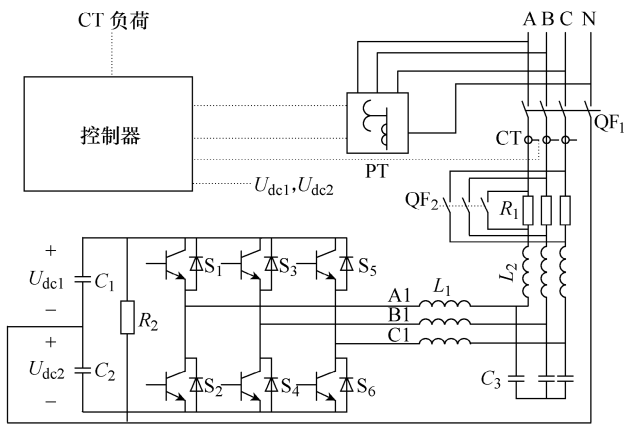


图 2 SVG 拓扑结构图

Fig.2 Topology configuration of SVG

## 2 控制策略

为实现分布式接入的各 SVG 的协调控制，以实现各 SVG 容量的充分利用，以及补偿系统对不平衡电流、节点低电压等问题的综合补偿，补偿系统中的 SVG 均采用协调控制策略，示意图如图 3 所示。

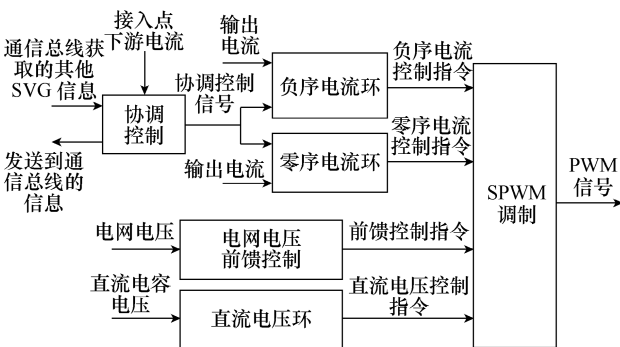


图 3 SVG 控制策略示意图

Fig.3 Diagram of SVG control strategy

在图 3 中，SVG 控制策略示意图含 6 个模块：协调控制、负序电流环、零序电流环、电网电压前馈控制、直流电压环和正弦脉宽调制（Sine Pulse Width Modulation, SPWM）。协调控制模块负责计算补偿接入点下游不平衡电流所需容量，与通信总线交互信息，在发送自身信息的同时获取其他 SVG 的信息，并生成协调控制信号（新的不平衡电流补偿指令）；负序电流环和零序电流环实现 SVG 对不平衡电流的控制；电网电压前馈控制实现 SVG 对电网电压变化的快速响应，同时减轻其他控制环的调节压力；直流电压环实现 SVG 的直流侧电压平衡；SPWM 模块汇总 SVG 各模块所得控制指令并得到总控制指令，该指令经 SPWM 调制得到 SVG 的 PWM 控制信号。

### 2.1 协调控制

协调控制模块负责 SVG 与通信总线进行通信和生成协调控制信号，模块控制框图如图 4 所示。协调控制模块包括三部分：下游负荷不平衡电流计算、协调控制电流计算和协调控制信号计算。

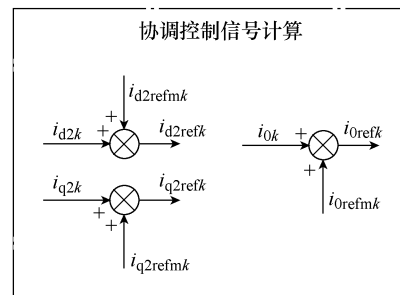
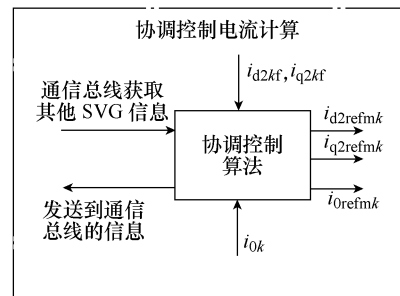
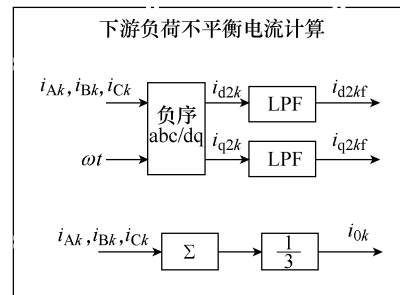


图 4 协调控制模块控制框图

Fig.4 Control diagram of coordinated control module

图4中,  $i_{Ak}$ 、 $i_{Bk}$ 、 $i_{Ck}$ 分别为第 $k$ 个( $k \in \{1,2,3,4\}$ )接入点下游三相电流;  $\omega t$ 为SVG接入的电压相位;  $i_{d2k}$ 、 $i_{q2k}$ 分别为d、q坐标下游负荷电流的负序分量;  $i_{d2kf}$ 、 $i_{q2kf}$ 分别为 $i_{d2k}$ 、 $i_{q2k}$ 低通滤波后的信号;  $i_{0k}$ 为下游负荷电流的零序分量;  $i_{d2refmk}$ 、 $i_{q2refmk}$ 、 $i_{0refmk}$ 分别为生成负序和零序协调控制电流指令信号;  $i_{d2refk}$ 、 $i_{q2refk}$ 、 $i_{0refk}$ 分别为负序和零序电流协调控制信号。

(1) 在下游负荷不平衡电流计算中,  $i_{Ak}$ 、 $i_{Bk}$ 、 $i_{Ck}$ 基于负序dq变换得到 $i_{d2k}$ 、 $i_{q2k}$ , 即

$$\begin{bmatrix} i_{d2k} \\ i_{q2k} \end{bmatrix} = C_P \begin{bmatrix} i_{Ak} \\ i_{Ck} \\ i_{Bk} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$C_P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

低通滤波得到 $i_{d2kf}$ 、 $i_{q2kf}$ ,  $i_{Ak}$ 、 $i_{Bk}$ 、 $i_{Ck}$ 取平均值得 $i_{0k}$ 。

(2) 协调控制电流计算的算法如图5所示。

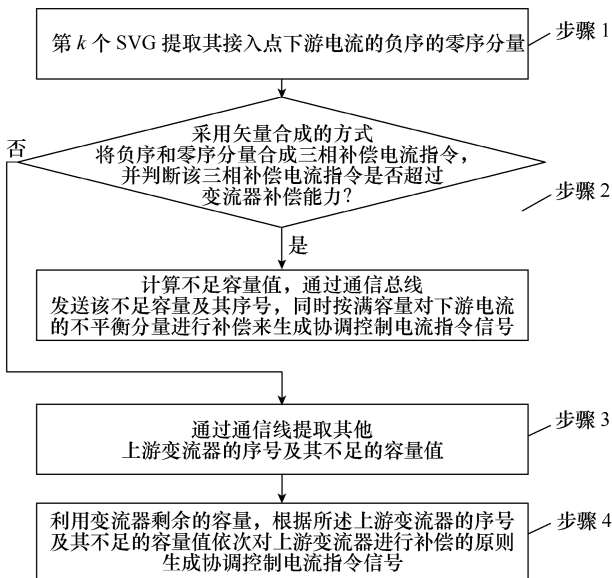


图5 协调控制算法

Fig.5 Coordinated control algorithm

第 $k$ 个SVG提取其接入点下游电流负序及零序分量 $i_{d2k}$ 、 $i_{q2k}$ 、 $i_{0k}$ , 计算补偿所需容量值, 并判断该值是否超其补偿能力; 如超出补偿能力, 发送其不足的补偿容量及其序号(按照低压线路从线路首端到末端方向将SVG接入点编号)到通信总线, 并

按满容量补偿来生成协调控制电流指令 $i_{d2refmk}$ 、 $i_{q2refmk}$ 、 $i_{0refmk}$ ; 如未超出补偿能力, 提取其他上游SVG信息(包括各SVG的不足的补偿容量及其序号), 并计算其剩余容量可补偿上游SVG的不足容量, 生成协调控制电流指令 $i_{d2refmk}$ 、 $i_{q2refmk}$ 、 $i_{0refmk}$ 。

(3) 在协调控制信号计算中,  $i_{d2kf}$ 、 $i_{q2kf}$ 、 $i_{0k}$ 与协调控制电流指令 $i_{d2refmk}$ 、 $i_{q2refmk}$ 、 $i_{0refmk}$ 分别相加, 得到协调控制信号 $i_{d2refk}$ 、 $i_{q2refk}$ 、 $i_{0refk}$ 。

## 2.2 负序电流环

负序电流环控制框图如图6所示。

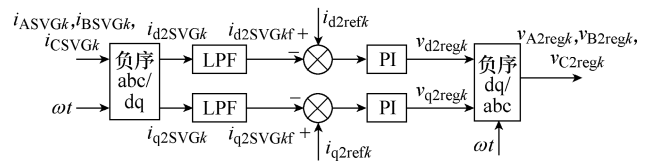


图6 负序电流环控制框图

Fig.6 Diagram of negative-sequence current control

图6中,  $i_{ASVGk}$ 、 $i_{BSVGk}$ 、 $i_{CSVGk}$ 分别为第 $k$ 个SVG输出的三相电流;  $i_{d2SVGk}$ 、 $i_{q2SVGk}$ 分别为d、q坐标下游负荷电流的负序分量;  $i_{d2SVGkf}$ 、 $i_{q2SVGkf}$ 分别为 $i_{d2SVGk}$ 、 $i_{q2SVGk}$ 低通滤波器后的信号;  $v_{d2regk}$ 、 $v_{q2regk}$ 分别为负序电流环两个PI调节器的输出信号;  $v_{A2regk}$ 、 $v_{B2regk}$ 、 $v_{C2regk}$ 分别为abc坐标系下的负序电流环输出指令信号。

基于负序dq变换可得 $i_{d2SVGk}$ 、 $i_{q2SVGk}$ , 即

$$\begin{bmatrix} i_{d2SVGk} \\ i_{q2SVGk} \end{bmatrix} = C_P \begin{bmatrix} i_{ASVGk} \\ i_{CSVGk} \\ i_{BSVGk} \end{bmatrix} \quad (3)$$

低通滤波后得到 $i_{d2SVGkf}$ 、 $i_{q2SVGkf}$ ,  $i_{d2SVGkf}$ 、 $i_{q2SVGkf}$ 分别通过PI调节器调节, 可对协调控制信号 $i_{d2kf}$ 、 $i_{q2kf}$ 准确跟踪, 以实现SVG准确地对负序负载电流进行协调补偿, 并得到PI调节器输出 $v_{d2regk}$ 、 $v_{q2regk}$ 。为符合SPWM调制需要, 将dq坐标系下的 $v_{d2regk}$ 、 $v_{q2regk}$ 变换为abc坐标系下的 $v_{A2regk}$ 、 $v_{B2regk}$ 、 $v_{C2regk}$ , 公式为

$$\begin{bmatrix} v_{A2regk} \\ v_{C2regk} \\ v_{B2regk} \end{bmatrix} = C_{PR} \begin{bmatrix} v_{d2regk} \\ v_{q2regk} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中

$$C_{PR} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.3 零序电流环

零序电流环控制框图如图 7 所示。

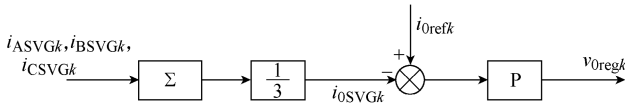


图 7 零序电流环控制框图

Fig.7 Diagram of zero-sequence current control

图 7 中,  $i_{0SVGk}$  为 abc 坐标系第  $k$  个 SVG 输出电流的零序分量,  $v_{0regk}$  为零序电流环比例调节器的输出信号。 $i_{0SVGk}$  由三相输出电流  $i_{ASVGk}$ 、 $i_{BSVGk}$ 、 $i_{CSVGk}$  取平均得到, 并通过比例调节, 对协调信号  $i_{0refk}$  准确跟踪, 以实现 SVG 准确地对零序负载电流进行协调补偿。上述比例调节器输出为  $v_{0regk}$ 。

### 2.4 电网电压前馈控制

电网电压前馈控制, 控制框图如图 8 所示。

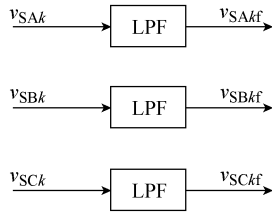


图 8 电网电压前馈控制框图

Fig.8 Diagram of grid voltage feedforward control

图 8 中,  $v_{SAk}$ 、 $v_{SBk}$ 、 $v_{Sck}$  分别为 abc 坐标系下第  $k$  个 SVG 接入点处的三相电网电压采样信号;  $v_{SAkf}$ 、 $v_{SBkf}$ 、 $v_{Sckf}$  分别为  $v_{SAk}$ 、 $v_{SBk}$ 、 $v_{Sck}$  经低通滤波后的信号。

三相电网电压采样信号  $v_{SAk}$ 、 $v_{SBk}$ 、 $v_{Sck}$  经低通滤波后得到  $v_{SAkf}$ 、 $v_{SBkf}$ 、 $v_{Sckf}$  作为电网电压前馈控制信号。电网电压前馈控制可实现 SVG 对电网电压变化的快速响应, 同时减轻其他控制环的调节压力。

### 2.5 直流电压环

直流电压环用于平衡 SVG 的直流侧电压, 控制框图如图 9 所示。

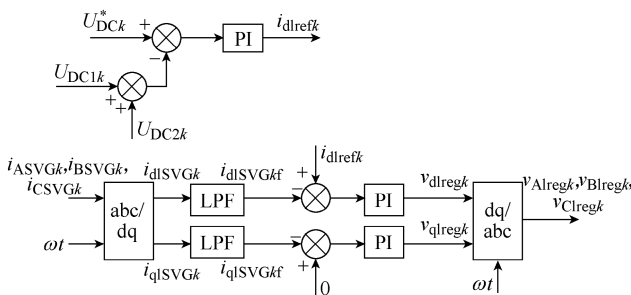


图 9 直流电压环控制框图

Fig.9 Diagram of DC voltage control

图 9 中,  $U_{DC1k}$ 、 $U_{DC2k}$  分别为第  $k$  个 SVG 的两个直流侧电容电压;  $U_{DCk}$ 、 $U_{DCk}^*$  分别为直流侧电压和直流侧电压指令;  $i_{d1refk}$  为正序有功电流指令信号;  $i_{d1SVGk}$ 、 $i_{q1SVGk}$  分别为 d、q 坐标下游负荷电流的正序分量;  $i_{d1SVGkf}$ 、 $i_{q1SVGkf}$  分别为  $i_{d1SVGk}$ 、 $i_{q1SVGk}$  经低通滤波后得的信号;  $v_{d1regk}$ 、 $v_{q1regk}$  分别为 dq 坐标系直流电压环输出指令信号;  $v_{A1regk}$ 、 $v_{B1regk}$ 、 $v_{C1regk}$  分别为 abc 坐标系直流电压环输出指令信号。

SVG 的两个直流侧电容电压  $U_{DC1k}$  和  $U_{DC2k}$  相加得到直流侧电压  $U_{DCk}$ , 该电压通过 PI 调节跟踪直流侧电压指令  $U_{DCk}^*$ ; 上述 PI 调节器输出为  $i_{d1refk}$ , 作为正序有功电流的指令信号。

SVG 三相输出电流  $i_{ASVGk}$ 、 $i_{BSVGk}$ 、 $i_{CSVGk}$  通过 dq 变换可得到 dq 坐标系下的  $i_{d1SVGk}$ 、 $i_{q1SVGk}$ , 即

$$\begin{bmatrix} i_{d1SVGk} \\ i_{q1SVGk} \end{bmatrix} = C_P \begin{bmatrix} i_{ASVGk} \\ i_{BSVGk} \\ i_{CSVGk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

经低通滤波后得  $i_{d1SVGkf}$ 、 $i_{q1SVGkf}$ 。

$i_{d1SVGkf}$ 、 $i_{q1SVGkf}$  分别通过 PI 调节器调节对正序电流指令信号  $i_{d1refk}$  和 0 准确跟踪, 以实现 SVG 通过有功电流的调节来平衡直流侧电压的功效。上述两个 PI 调节器输出分别为  $v_{d1regk}$ 、 $v_{q1regk}$ 。

为符合 SPWM 调制需要, 将 dq 坐标系下的  $v_{d1regk}$ 、 $v_{q1regk}$  转换为 abc 坐标系下的  $v_{A1regk}$ 、 $v_{B1regk}$ 、 $v_{C1regk}$ , 作为直流电压环输出指令信号, 即

$$\begin{bmatrix} v_{A1regk} \\ v_{B1regk} \\ v_{C1regk} \end{bmatrix} = C_{PR} \begin{bmatrix} i_{d1refk} \\ i_{q1refk} \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 2.6 SPWM 调制

SPWM 调制框图如图 10 所示。

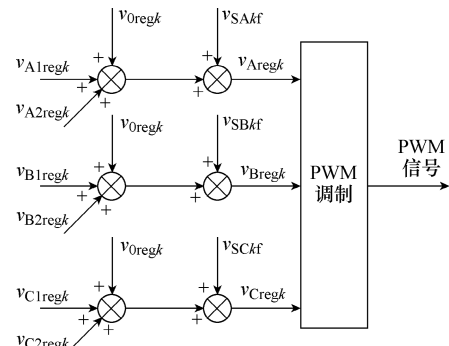


图 10 SPWM 调制框图

Fig.10 Diagram of SPWM regulation

图 10 中,  $v_{Aregk}$ 、 $v_{Bregk}$ 、 $v_{Cregk}$  分别为三相的总控制信号。

负序电流环、零序电流环、直流电压环和电网电压前馈控制的三相控制信号分别相加得到三相的总控制信号  $v_{Aregk}$ 、 $v_{Bregk}$ 、 $v_{Cregk}$ ，三相总控制信号进行 PWM 调制得到 SVG 三相桥臂各开关器件的 PWM 控制信号。

### 3 仿真分析

为验证本文所提出的补偿系统及控制策略的准确性，设计了如图 1 所示的低压配网结构：配电变压器二次电压有效值为 400V；除负荷 2 外的其他三个负荷为零，负荷 2 为电流源，其中所含的负序分量有效值 400A，零序分量有效值为 200A；4 个 SVG 分别并联接入到接入点 1~接入点 4，采用本文提出的协调控制策略，最大补偿电流有效值为 150A；各接入点之间的线路阻抗值相等，为  $0.025\Omega$ 。基于该结构电路，在 Matlab/Simulink 数字仿真软件下开展暂态电磁仿真。

图 11 为各 SVG 的补偿电流波形，因采用了协调控制策略，故即使 SVG3 和 SVG4 处于负荷 2 的线路接入点下游，也能产生逆向潮流补偿负荷 2 产生的不平衡电流。由于负荷 2 的不平衡电流达到 SVG 补偿系统的总容量，故 4 个 SVG 均满容量补偿。由图 11 可见 SVG1~SVG4 补偿电流相同，其中 A 相电流达到其最大补偿电流。

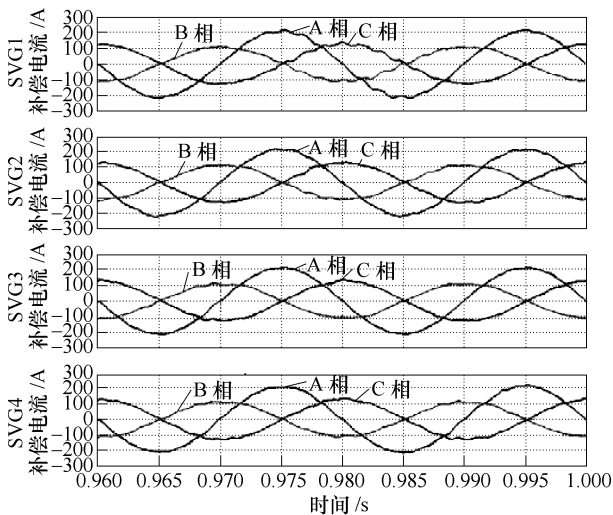


图 11 各 SVG 补偿电流

Fig.11 Compensation current waveforms of SVGs

图 12 包括负荷 2 的电流以及配电变压器二次电压、二次电流波形。由图 12 可见，负荷 2 的电流的不平衡分量较大，基于本文提出的补偿系统，配电变压器二次电流只含非常小的零序分量及谐波分

量，由此可知补偿系统对三相不平衡负荷电流起到了很好的补偿作用。

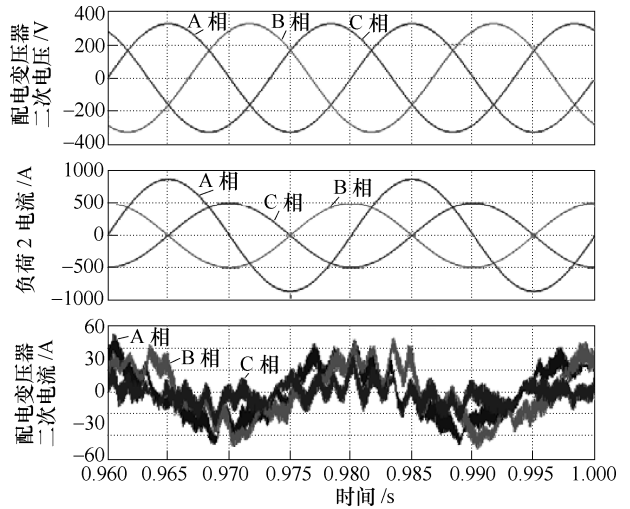


图 12 负荷 2 电流及配电变压器的二次电压、电流

Fig.12 Current of load 2 and voltage and current of distribution transformer secondary side

图 13 为各接入点的电压，由图中可见，本可能产生最大 30V 相电压跌落（A 相 600A 电流在两个  $0.025\Omega$  线路阻抗上的压降），由于补偿系统中部分 SVG 的逆向潮流，对不平衡电流有效地吸收，因此在接入点电压中未发现该明显的相电压跌落。

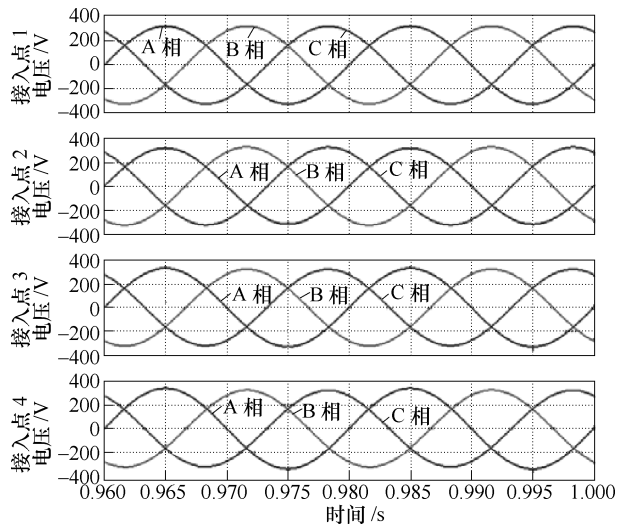


图 13 各接入点电压

Fig.13 Voltage waveforms of nodes

### 4 不同补偿系统的效果比较

以图 1 所示低压配网为例，本文采用四种不同的 SVG 补偿系统，基于理论计算，比较各补偿系统在不同三相负荷不平衡情况下配网配电变压器二次

侧三相不平衡电流和各节点电压降。

### 4.1 补偿系统结构及接入方式

四种补偿系统分别为：

(1) 补偿系统 1：本文所提出的基于协调控制 SVG 补偿系统，系统接线图如图 1 所示。

(2) 补偿系统 2：4 个 SVG 采用分布式接入低压配网线路（无通信线），系统接线图如图 14 所示。

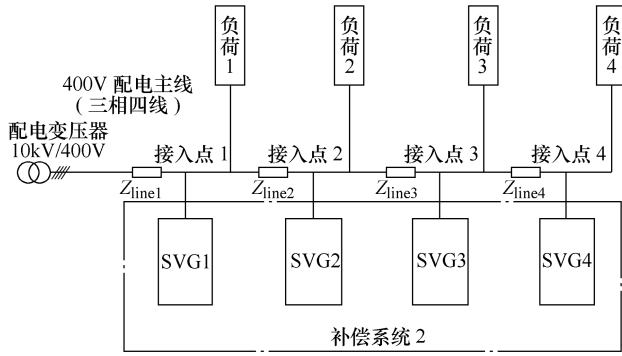


图 14 补偿系统 2 接线图

Fig.14 Connection diagram of compensation system 2

(3) 补偿系统 3：1 个 SVG 采用集中补偿方式接入配网配电变压器二次侧首端，系统接线图如图 15 所示。

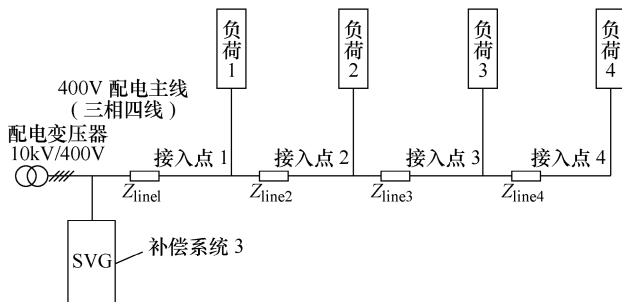


图 15 补偿系统 3 接线图

Fig.15 Connection diagram of compensation system 3

(4) 补偿系统 4：1 个 SVG 采用集中补偿方式接入配网低压线路中段（接入点 3 处），系统接线图如图 16 所示。

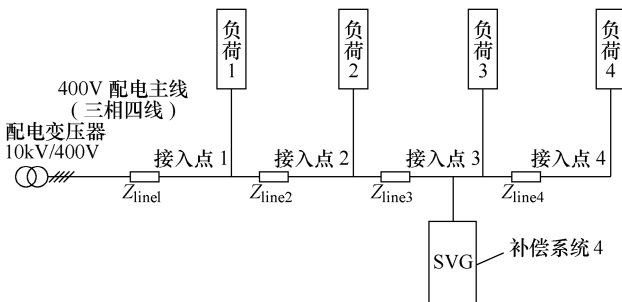


图 16 补偿系统 4 接线图

Fig.16 Connection diagram of compensation system 4

### 4.2 基本假设条件

为便于分析，作以下基本假设：①四种补偿系统所接配网条件相同；②线路阻抗  $Z_{line1} \sim Z_{line4}$  均相等，值为  $Z$ ；③负荷 1~负荷 4 为电流源型负荷，且只含负序和零序分量（不平衡分量），配网总负荷最大值为  $i_{Lmax}$ ；④四种补偿系统的 SVG 总容量相等，且最大可补偿的不平衡电流为  $i_{Lmax}$ ；⑤补偿系统 1 和补偿系统 2 所采用的 4 个 SVG 容量相等，且每个 SVG 最大可补偿的不平衡电流为  $0.25 i_{Lmax}$ 。

### 4.3 不同负荷情况比较

比较四种补偿系统在四种负荷情况下补偿效果，四种负荷情况对应的四种仿真（仿真 1~仿真 4）设置为：负荷 1~负荷 4 之一依次为最大不平衡负载  $i_{Lmax}$ ，其余负荷为零。

基于基尔霍夫定律，可以得到四种补偿系统在仿真 1~仿真 4 中配电变压器二次侧不平衡电流和不同接入点电压，见表 1~表 4。其中， $I_s$  为配电变压器二次侧不平衡电流； $V_1、V_2、V_3、V_4$  分别为接入点 1~接入点 4 相对于配电变压器二次侧的电压降； $V_m = Zi_{Lmax}$ 。

表 1 补偿系统 1 的仿真结果

Tab.1 Simulation results of compensation system 1

仿真序号	$I_s$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
1	0	0	$-0.75V_m$	$-1.25V_m$	$-1.50V_m$
2	0	0	$0.25V_m$	$-0.25V_m$	$-0.50V_m$
3	0	0	$0.25V_m$	$0.75V_m$	$-0.25V_m$
4	0	0	$0.25V_m$	$0.75V_m$	$1.50V_m$

表 2 补偿系统 2 的仿真结果

Tab.2 Simulation results of compensation system 2

仿真序号	$I_s$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
1	$0.75 i_{Lmax}$	$0.75V_m$	$0.75V_m$	$0.75V_m$	$0.75V_m$
2	$0.50 i_{Lmax}$	$0.50V_m$	$1.25V_m$	$1.25V_m$	$1.25V_m$
3	$0.25 i_{Lmax}$	$0.25V_m$	$0.75V_m$	$1.50V_m$	$1.50V_m$
4	0	0	$0.25V_m$	$0.75V_m$	$1.50V_m$

表 3 补偿系统 3 的仿真结果

Tab.3 Simulation results of compensation system 3

仿真序号	$I_s$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
1	0	$V_m$	$V_m$	$V_m$	$V_m$
2	0	$V_m$	$2.00V_m$	$2.00V_m$	$2.00V_m$
3	0	$V_m$	$2.00V_m$	$3.00V_m$	$3.00V_m$
4	0	$V_m$	$2.00V_m$	$3.00V_m$	$4.00V_m$

表4 补偿系统4仿真结果

Tab.4 Simulation results of compensation system 4

仿真序号	$I_s$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
1	$i_{Lmax}$	$V_m$	$V_m$	$V_m$	$V_m$
2	$i_{Lmax}$	$V_m$	$2.00V_m$	$2.00V_m$	$2.00V_m$
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	$V_m$

由表1可见,补偿系统1(即本文提出的补偿系统),采用了分布式接入SVG的方式和协调控制的控制策略,各SVG的补偿能力得到充分利用,配网配电变压器二次侧的不平衡电流在四种仿真中均为零。同时因该补偿系统可产生逆向潮流,故可降低各接入点之间的线路压降。

由表2可见,补偿系统2采用SVG分布式接入的方式,对各接入点的低电压有一定的补偿。因该系统SVG之间无通信,无法采用协调控制,故在仿真1~仿真3中有部分SVG无法补偿上游线路中的不平衡负荷,配网配电变压器首端不平衡电流不为零。

由表3可见,补偿系统3采用集中补偿方式,在配网配电变压器二次侧并联接入SVG,可充分补偿四种仿真的不平衡负荷电流,故配网配电变压器首端不平衡电流为零。因SVG无法补偿其接入点下游的节点电压,故该补偿系统的各接入点电压降问题最严重。

由表4可见,补偿系统4采用集中补偿方式,在低压线路中段并联接入SVG,在仿真1和仿真2中无法补偿上游线路中的不平衡负荷,故配网配电变压器首端不平衡电流不为零。在仿真2中,因SVG无法补偿其接入点前的不平衡负荷,故该补偿系统的各接入点电压降较严重。

综上所述,本文所提出的补偿系统在综合解决低压配网配电变压器二次侧三相电流不平衡和节点的低电压问题效果最佳。

## 5 结论

本文针对现有基于SVG三相负荷不平衡补偿系统不能同时兼顾平衡三相负荷电流和消除节点低电压的问题,在分布式接入SVG补偿系统的基础上,引入通信总线,提出协调控制方法,形成了基于协调控制SVG的低压配网三相负荷不平衡综合补偿系统。Matlab/Simulink下的仿真结果展示了本文所提补偿系统的使用效果,证明了该补偿系统的可行性。通过仿真对不同补偿系统在不同负荷情况

下低压配网配电变压器二次侧不平衡电流和各节点电压降的进行了对比,表明该补偿系统在综合解决低压配网配电变压器二次侧三相电流不平衡和节点的低电压问题效果最佳。本文所提补偿系统为低压配网综合解决因三相负荷不平衡带来的配电变压器电流不平衡和节点低电压问题提供了一种行之有效的方法。

## 参考文献

- [1] 叶伟杰. 江西电网配电变压器三相不平衡综合治理措施研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [2] 潘本仁, 余侃胜, 陈首昆, 等. 配电变压器三相不平衡分析及研究综述[J]. 江西电力, 2012(5): 63-65. Pan Benren, Yu Kansheng, Chen Shouqun, et al. Analysis and research summary of distribution transformer three-phase unbalance[J]. Jiangxi Electric Power, 2012(5): 63-65.
- [3] 蒋浩, 王淼. 三相负荷不平衡对低压网损影响的分析[J]. 供用电, 2008, 25(3): 68-70. Jiang Hao, Wang Miao. Analysis on the influence of unbalanced three-phase loads on LV line loss[J]. Distribution & Utilization, 2008, 25(3): 68-70.
- [4] Bachry A, Styczynski Z A. An analysis of distribution system power quality problems resulting from load unbalance and harmonics[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas, 2003: 763-766.
- [5] Njafi A, Iskender I, Genc N, Evaluating and derating of three-phase distribution transformer under unbalanced voltage and unbalance load using finite element method[C]//IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), Langkawi, 2014: 160-165.
- [6] Arunprasanth S, Arulampalam A, Binduhewa P J, et al. Dynamic reactive power compensator (DRPC) for unbalance load reactive power compensation[C]//IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems, Peradeniya, 2013: 531-536.
- [7] Vicente L M, Joaquin M R, Jose M P. Passive unbalance compensation device for three-phase variable loads[C]//The 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Rome, 2011: 1-4.
- [8] Pana A, Baloi A, Molnar-Matei F. Load balancing



- by unbalanced capacitive shunt compensation—A numerical approach[C]//The 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Bergamo, 2010: 1-6.
- [9] Youssef T A, Elsayed A T, Berzoy A, et al. Power quality enhancement for nonlinear unbalanced loads through improved active power filter control[C]// The 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Dallas, 2014: 5202-5207.
- [10] Saeed Y, Mahmoud E, Seyed H T. Presents a new topology for parallel compensator to improve the load unbalance in electrical energy distribution network [C]//The 20th Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), Zahedan, 2015: 246-253.
- [11] Karvekar S, Patil D. A novel technique for implementation of shunt active power filter under balanced and unbalanced load conditions circuits[C]// International Conference on Power and Computing Technologies (ICCPCT), Nagercoil, 2013: 1-5.
- [12] 辛业春, 李国庆, 王朝斌. 无功和三相负荷不平衡的序分量法补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 72-78.  
Xin Yechun, Li Guoqing, Wang Chaobin. Compensation control of reactive power and three-phase unbalance load based on the method of sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 72-78.
- [13] 阳同光, 桂卫华. 电网不平衡情况下并网逆变器多目标协调控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 148-157.  
Yang Tongguang, Gui Weihua. Research on multi-objective coordinated control strategies of grid-connected inverter under unbalanced voltage conditions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 148-157.
- [14] Zhang S, Luo F L. A novel control strategy for load converter of renewable energy under unbalanced loading[C]//The 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Singapore, 2012: 1506-1511.
- [15] 阳同光, 桂卫华. 电网不平衡情况下并网逆变器控制策略综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 241-246.  
Yang Tongguang, Gui Weihua. An overview on control strategies of grid-connected inverter under unbalanced voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 241-246.
- [16] 赵新, 金新民, 杨捷, 等. 并网逆变器新型不平衡控制方案[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 257-265.  
Zhao Xin, Jin Xinmin, Yang Jie, et al. Novel unbalanced control scheme of grid-connected inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 257-265.
- [17] 鞠洪兵, 王德涛, 张金斗. 角形链式 SVG 补偿不平衡负载的控制策略[J]. 电气技术, 2014, 15(增刊 1): 18-23.  
Ju Hongbing, Wang Detao, Zhang Jindou. Control strategy of delta chain SVG for compensating unbalance load[J]. Electrical Engineering, 2014, 15(S1): 18-23.
- [18] 马皓, 林钊, 王小瑞. 不平衡非线性负载下三相逆变器的建模与控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 83-95.  
Ma Hao, Lin Zhao, Wang Xiaorui. Modeling and control of three-phase inverter powering unbalanced and nonlinear loads[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 83-95.
- [19] 周啸, 金新民, 唐芬, 等. 微电网孤岛工况下基于四桥臂逆变器的不平衡负载分配策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 76-86.  
Zhou Xiao, Jin Xinmin, Tang Fen, et al. Four-leg converter based unbalanced load sharing method in islanding microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 76-86.

---

#### 作者简介

邓惠华 男, 1976 年生, 本科, 工程师, 现主要从事电网生产设备技术管理工作。

E-mail: dna93830@163.com

王浩 男, 1976 年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为配网电能质量分析与控制。

E-mail: whhao1@163.com (通信作者)

(编辑 张玉荣)