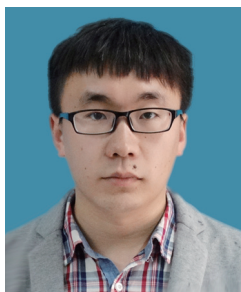


系统不平衡情况下静止无功发生器控制策略与仿真研究

通过分析静止无功发生器（Static Var Generator, SVG）的工作原理及其在配电网系统不平衡状态下的补偿原理，在传统负序电流检测方法中增添了正、负序电流分离与检测和滤波环节，提出了基于正、负 dq 坐标系的补偿控制策略，设计了两组分别建立在正、负序 dq 坐标系的PI控制器，实现了对正序和负序分量的双向同步独立控制，搭建了不平衡系统仿真模型，以系统负载不对称配电网为例进行仿真实验，结果表明所提控制策略性能优越。

牛云涛 孟泽皓 聂海龙/河北工业大学电气工程学院
李聪利/天津市电力公司城西供电分公司



牛云涛/硕士研究生

关键词/Keywords

配电网 ·
不平衡系统 ·
静止无功发生器 (SVG) ·
控制策略 ·

随着现代工业的发展，配电网复杂性逐渐增加，系统的不平衡日渐成为一个不可忽略的因素。系统不平衡会增加线路及用电设备的损耗，使用电效率大大降低，而且还会引起继电保护设备的误动作，破坏电网的正常运行。由于系统中的各种设备均为针对系统平衡运行设计的，因此系统不平衡将影响设备的正常运行，还会增加配电网谐波分量，干扰系统的通信^[1]。现有的SVG控制策略主要是建立在理想的系统平衡假设之上，在系统不平衡时，若SVG仍采用系统平衡时的控制策略，将会很大程度降低装置的控制性能，甚至会对SVG本身造成一定程度的损坏^[2]。因此，研究适用于不平衡系统下的SVG控制策略，使其在系统不平衡时也能安全稳定运行并发挥良好的无功补偿性能显得尤为重要。

河北省科技支撑计划项目（13212104），天津市高等学校科技发展基金计划项目（20130423），大学生创新创业训练计划项目国家级立项项目（201310080017）。

本文在传统的单序控制的基础上，提出了基于正、负 dq 坐标系的补偿控制策略，不仅满足了系统对正序无功电流的需求，同时有效抑制了电网中的负序电流，降低了电网的不平衡度。

理论基础

1. SVG工作原理

静止无功发生器（SVG）主要由以下几个部分组成：主电路、电网侧参数实时检测处理电路、装置侧参数实时检测处理电路、实时监测保护电路、驱动电路以及控制系统。静止无功发生器（SVG）是通过调节SVG装置交流侧输出电压的相位和幅值，吸收或发出满足电网要求的无功功率来实现无功补偿。本文以三相桥式电压型逆变电路为主电路的SVG为例说明其工作原理。SVG单相等效电路如图1所示。

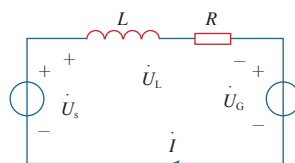


图1 SVG的等效电路

设电网电压为 $\dot{U}_s$ ，SVG输出的交流电压为 $\dot{U}_G$ ，连接电抗器上的电压上为 $\dot{U}_L$ ，由基尔霍夫电压定律有

$$\dot{U}_s = \dot{U}_G + \dot{U}_L \quad (1)$$

电网电压 $\dot{U}_s$ 与电流 i 的相位差为 $90^\circ - \delta$ ，因此，需要从电网吸收有功功率弥补电路中的损耗，改变 δ 角与 $\dot{U}_G$ 的幅值，即可改变电流 i 的相位和大小，以实现静止无功发生器吸收或发出无功功率的调节。

2. 不平衡系统电流检测

实时准确检测出补偿所需无功电流是SVG装置进行无功补偿的首要工作,其原理为:利用检测信号与系统参考信号进行比较,从而获取所需补偿控制信号。本文选取基于dq坐标变换的方法作为不平衡电流检测的方法。

(1) dq坐标变换检测法基本原理

设系统三相电压和电流瞬时值分别为 $u=[u_a \ u_b \ u_c]^T$, $i=[i_a \ i_b \ i_c]^T$,将三相基波分量经坐标变换得到的d轴和q轴分量,则有

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} = C_T \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\text{式中, } C_T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \omega t & \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \omega t & -\sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix}。$$

因为零轴分量不起作用,所以也可将dq0坐标变换简化成dq坐标变换。滤除高次谐波分量后,得到表征三相的基波正序电流 $[i_{dp} \ i_{qp}]^T$,而后经过park反变换,即可得出三相基波瞬时基波电流 i_p ,即

$$i_p = [i_{ap} \ i_{bp} \ i_{cp}]^T = C_{32}^{-1} C_T^{-1} [i_{dp} \ i_{qp}]^T \quad (3)$$

$$\text{式中, } C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix}。$$

用三相系统的总电流减去三相瞬时基波电流即可得到三相谐波电流分量,即为需要补偿的总电流。

(2) dq坐标变换下的正、负序电流检测方法

在不平衡系统中,将dq轴电压分离、变换到正序旋转坐标系下,则有

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_d^p \\ u_q^p \end{pmatrix} + R(-2\omega t) \begin{pmatrix} u_d^n \\ u_q^n \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, $R(-2\omega t) = \begin{pmatrix} \cos 2\omega t & \sin 2\omega t \\ -\sin 2\omega t & \cos 2\omega t \end{pmatrix}$,上标p为正序分量;n为负序分量。

电路中的正序分量经两相正序旋转坐标系变换后,变成了直流分量。但由于系统不平衡产生的负序分量会使式(4)得到的直流分量出现二倍频的波动,影响了正序分量的检测,故本文使用角频率为 2ω 的陷波器,滤除由负序分量引起的电容侧直流分量上的二倍频波动,得正序的dq分量,经坐标变换即可得到正序的交流分量。用检测到的总不平衡电流与此正序分量作差,便可得系统中的负序分量。

系统不平衡下的SVG控制策略

1. 不平衡系统SVG系统数学建模

在三相三线制系统中,交流分量通常仅分解为正序分量和负序分量,忽略零序分量对于系统的作用。SVG在不平衡负载下,仅考虑基波分量时的正、负序复矢量模型为

$$\begin{cases} L \frac{dI_{dq}^p}{dt} + RI_{dq}^p + j\omega LI_{dq}^p + \frac{1}{2} U_{dc} S_{dq}^p = U_{dq}^p \\ L \frac{dI_{dq}^n}{dt} + RI_{dq}^n + j\omega LI_{dq}^n + \frac{1}{2} U_{dc} S_{dq}^n = U_{dq}^n \end{cases} \quad (5)$$

式中, I_{dq}^p 、 I_{dq}^n 为(d,q)坐标系下系统开关函数的正、负序复矢量,表达式为

$$\begin{cases} I_{dq}^p = I_d^p + jI_q^p, S_{dq}^p = S_d^p + jS_q^p \\ I_{dq}^n = I_d^n + jI_q^n, S_{dq}^n = S_d^n + jS_q^n \end{cases} \quad (6)$$

由此可以看出,系统不平衡时,交流分量经对称分量法分解得到的正序分量和负序分量互不影响,满足独立控制的要求。

2. 不平衡系统下SVG补偿控制策略

系统不平衡时,传统电流内环控制方法只能补偿正序电流分量,无法补偿负序电流分量,很大程度地影响SVG的补偿效果。因此,本文提出了基于dq坐标系的正、负序补偿控制策略,其原理是将相电压电流复矢量经过 ω_0 和 $-\omega_0$ 的dq旋转坐标变换,将正、负分量从中分离出来,然后分别对正序和负序分量进行补偿,实现电流内环地无静差控制。

本文使用陷波器滤除了电流有功及无功分量中含有的二次谐波,即可得到正序电流无功分量控制指令 i_{qp}^* 。然后将SVG输出的电流作正序变

换,得到实际输出的正、负序电流值分别为 i_{dp} 、 i_{qp} ,而后将正、负序电流值与指令值作差后经内环解耦和PI调节器控制得到正序电压输出信号 V_{dp}^* 、 V_{qp}^* 。电流内环的负序控制与正序类似,这里不再论述。将正序电压输出信号 V_{dp}^* 、 V_{qp}^* 与负序电压输出信号 V_{dn}^* 、 V_{qn}^* 叠加后得到SVG装置最终输出的电压信号 V_d^* 、 V_q^* ,而后经 dq 坐标变换及三相坐标逆变换,得到PWM调制信号。

(1) 电流内环控制

电流内环控制策略中设计了两组PI控制器:一组建立在正序 dq 坐标系上,只对正序分量进行控制,称为基于电流内环的正序控制器;另一组PI控制器建立在负序 dq 坐标系上,对负序分量进行控制,称为基于电流内环的负序控制器。这两种控制器实现了对电流的正、负序同步补偿控制,其控制系统原理如图2所示。

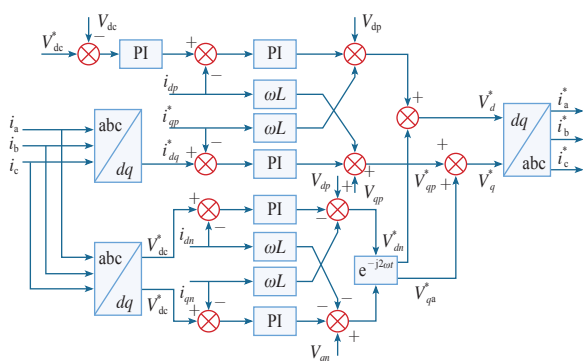


图2 双序电流控制系统原理图

(2) 电压外环控制

为了处理系统不平衡引入的负序分量,在电压的外环增加了负序电压控制器,并将负序电压控制器的给定设为 $u_{dn}^*=0$, $u_{qn}^*=0$ 。并将 d 轴和 q 轴上负序电压 u_{dn} 、 u_{qn} 控制器的输出分别作为内环电流 i_{dn} 、 i_{qn} 控制器的给定,有效地降低了电网不平衡度。

仿真与分析

本文以三相负载不平衡为例,用传统的方法与本文所提出的补偿控制法,利用Matlab/Simulink软件平台进行仿真分析,以验证所提方法的有效性^[6]。

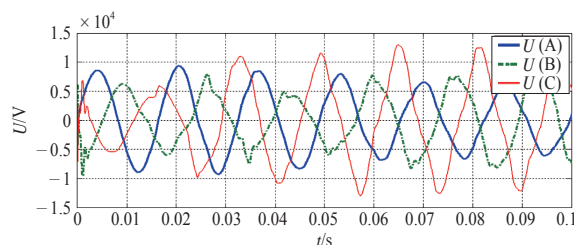
1. 仿真模型与参数设置

所建仿真模型为10 kV配电网接三相不平衡负载,电源为三相可编程电压源,母线B1和PCC之间为10 km的配电线,其正序参数为: $R_p=0.2316 \Omega/\text{km}$, $L_p=1.386 \text{ mH}/\text{km}$, $C_p=14.33 \text{ pF}/\text{km}$;负序参数为: $R_n=0.3754 \Omega/\text{km}$, $L_n=2.754 \text{ mH}/\text{km}$, $C_n=7.331 \text{ pF}/\text{km}$ 。PCC后接一个10 kV/380 V降压变压器,SVG直流侧的电容值为10 μF ,直流侧的电压参考值为3 kV,负载侧接一个三相不平衡负载,其参数为: $R_A=300 \Omega$, $R_B=600 \Omega$, $R_C=900 \Omega$; $L_A=10 \text{ H}$, $L_B=20 \text{ H}$, $L_C=30 \text{ H}$;开关频率为1.5 kHz。

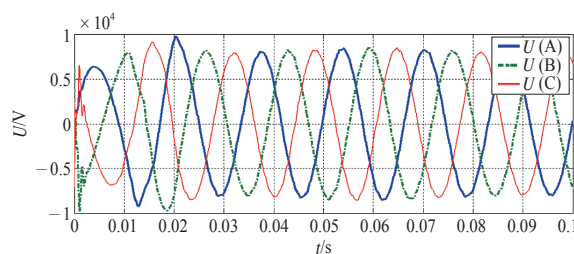
2. 仿真结果分析

(1) 公共节点(PCC)电压的分析

在负载不对称的前提下,采用传统的控制策略和本文所提出的控制策略,所得到的PCC处三相电压波形如图3所示。



(a) 传统控制策略下PCC处电压波形图



(b) 所提控制策略下PCC处电压波形图

图3 两种控制方法下PCC处电压波形图

由于负序电压的存在,经传统的电压补偿策略补偿下的系统节点电压幅值仍出现了明显的波动,三相节点电压也出现了严重的不平衡,没有达到应有的补偿效果。采用本文所述控制策略后,节点电压波形大约经过1个周期的调整再次恢复平衡,且平衡度较好,其负序分量和谐波分量得到了很好地抑制。

(2) PCC处负序电压的变化过程

为系统接不对称负载时,采用本文所提出的

控制策略下PCC处负序电压随时间变化的波形如图4所示。

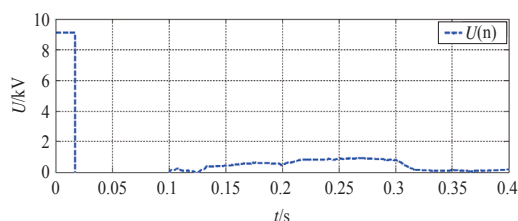
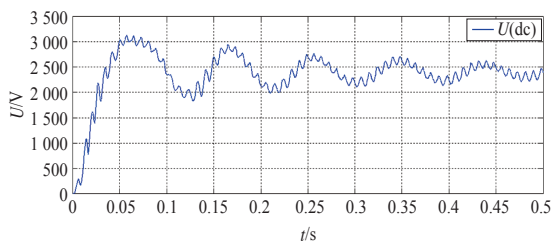


图4 PCC处A相的负序电压

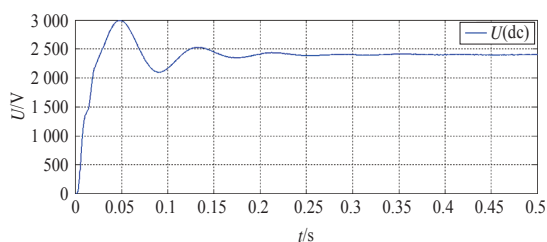
由图4可知,提出的控制策略控制SVG进行补偿后,负序电压从开始的9 kV逐渐降为0 kV,PCC处的负序电压得到了良好地抑制。

(3) 直流侧电压的分析

采用传统的补偿方法和所提补偿策略得到的SVG直流侧电压仿真波形如图5所示。



(a) 传统控制方法下的直流侧电压波形



(b) 所提控制策略控制下的直流侧电压波形

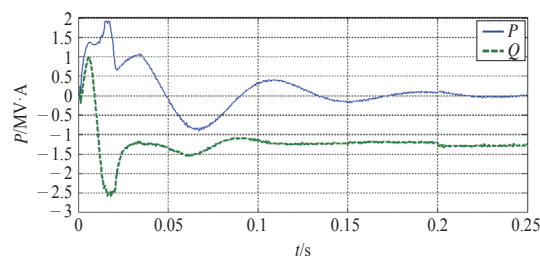
图5 两种控制方法下SVG直流侧电压波形

从图5a可看出,直流侧的电压存在2倍于电网频率的波动,上下波动近乎500~1 000 V,这样会影响SVG的正常工作,严重时甚至会导致SVG退出运行。从图5b可看出,在经历了3~4个周期后,直流电压的二倍频波动得到了有效地抑制,说明采用所提控制策略可以有抑制直流侧电压的二倍频波动,维持SVG的正常工作。

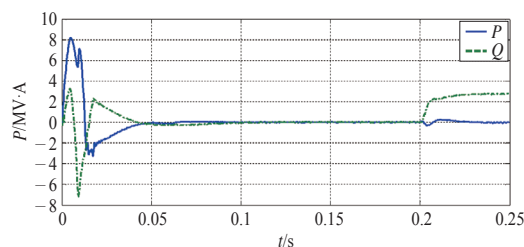
(4) 有功功率与无功功率的分析

在负载不对称情况下,采用传统的单序补偿

法和所提控制策略PCC处有功功率和无功功率波形如图6所示。



(a) 传统控制方法下PCC处的有功功率和无功功率图



(b) 所提控制策略下PCC处的有功和无功的波形

图6 两种方法下PCC处的有功功率和无无功功率图

由于负序分量的存在,图6a中电网的有功功率波动比较大,有1~2 MV·A。而对比图6b,可以看出经过两个周期多后,有功功率几乎维持不变,只是在无功功率突变时有所波动,显示了良好的负序补偿功能。

结束语

本文对系统不平衡时SVG系统的控制策略进行了理论分析,提出了相应的不平衡控制策略,并搭建了仿真模型进行验证。结果表明,所提方法能够很好地抑制电压波动,维持三相电压的平衡运行,而且无功功率得到了准确、快速的补偿,同时能有效抑制负序电流,表现出较强的鲁棒性。

参考文献

- [1] 傅旭,王锡凡,杜正春.电力系统电压稳定性研究现状及其展望[J].电力自动化设备,2005,25(2):1-9.
- [2] 张志文,申建强.基于新型全数字锁相环的SVG系统[J].电气传动,2010,40(10):36-39.

(收稿日期:2015-02-07) EA