

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.008

# 微电网电压不平衡的分层补偿控制策略

黎金英<sup>1,2</sup>, 艾欣<sup>1</sup>, 邓玉辉<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 102206 北京; 2. 绥和工业学院, 电气与电子工程学院, 56000 越南 绥和)

**摘要:** 微电网是消纳分布式电源的有效手段之一, 然而也带来了其自身的电压控制的难题, 特别是公共连接点处的三相电压不平衡问题比较突出, 为此提出一种微电网公共连接点电压双极补偿控制方法, 上层控制发送与电压的正序和负序分量有关的控制信号, 采用双电流环的控制器可得到电流给定值; 下层控制通过双电流环控制器实施. 针对 PCC 点三相电压不平衡的问题, 应用 dq 旋转坐标分解原理, 提出一种基于改进解耦的双同步坐标系锁相环 (IDDSRF-PLL) 的控制方法, 能够实现正负序分量的独立控制, 并通过控制给定模型的正负序电流和电压不平衡补偿控制器得到三相平衡电压, 使得公共连接点母线电压的二倍频波动部分为零, 从而实现了三相电压不平衡的补偿控制. 利用 MATLAB/Simulink 对微电网接入电网进行建模仿真, 结果表明, 分层控制方法能够较好的实现对微电网的电压控制.

**关键词:** 微电网; 三相电压不平衡; 锁相环; PQ 控制; 分层控制

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)03-0046-07

## Hierarchical control strategy for voltage unbalance compensation in micro-grid

LE Kim Anh<sup>1,2</sup>, AI Xin<sup>1</sup>, DANG Ngoc Huy<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), 102206 Beijing, China; 2. Electrical and Electronic Engineering, Tuy Hoa Industrial College, 56000 Tuy Hoa, Vietnam)

**Abstract:** Micro-grid is one of the effective means to absorb distributed generations; however, this also results in issues of voltage instability and difficulty in operation controlling of the micro-grid, especially the unbalanced three-phase voltage at the point of common coupling (PCC). This paper proposes a control for micro-grid voltage bipolar compensation at the point of common coupling, the upper level sends the control signals, these control signals relate to the positive-and negative-sequence components of the unbalanced voltage, dual the current control loop current setpoint is obtained. The lower control loop controller through dual current implementation, in view of the PCC point of three-phase voltage imbalance problem, application of dq rotating coordinate decomposition principle, proposed dual synchronous coordinate system based on improved decoupling phase-locked loop (IDDSRF-PLL) to independently control the positive and negative sequence voltage component. Furthermore, the three-phase balance voltage could be achieved by controlling the model of positive and negative sequence currents, and using the unbalance voltage compensation controller, bus voltage doubler fluctuation at point of common coupling is zero, thus realizing the three-phase control voltage unbalance compensation. MATLAB/Simulink software is used to set up the simulation model of connecting micro-grid to the main grid. The simulation results show that the hierarchical control method is effective to implement voltage control of micro-grid.

**Keywords:** microgrid; three-phase voltage unbalance; phase-locked loop; PQ control; hierarchical control

近年来,越来越多的分布式电源 (distributed generation, DG) 接入微电网,对微电网系统的稳定性产生了很大的影响;微电源的运行特性及控制方法、微电源的接入点和容量、微电网运行方式和控制方法、一般采用的电力电子装置、储能设备和负荷特性

都会对电能质量产生影响,从而会导致公共连接点 (point of common coupling, PCC) 的微电网电压不平衡<sup>[1]</sup>. 当微电网公共连接点的电压不平衡时,微电网电压存在正负序分量,如果没有补偿措施,不平衡电压可能导致失去电机负荷和敏感装置的异常运行等情况,给微电网带来电能质量问题<sup>[2]</sup>. 因此,研究微电网电压不平衡补偿,基于分层控制的运行控制具有重要的实际意义. 目前已有文献对不平衡微电网电压补偿主要是通过串联电能质量控制器以及向线路注入负序电压分量来实现的<sup>[3]</sup>. 文献[4]提出

收稿日期: 2014-07-08.

基金项目: 国家自然科学基金(513111122); 高等学校学科创新引智计划(B08013); 国家高技术研究发展计划(2011AA05A301).

作者简介: LE Kim Anh (黎金英) (1979—), 男, 博士研究生; 艾欣 (1964—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: LE Kim Anh (黎金英), tdhlekimanh@gmail.com.

采用并联电能质量控制器来抑制电压不平衡,通过补偿线路电流来实现电压不平衡补偿.但是没有考虑到负荷出现严重不平衡时会导致分布式电源并网逆变器输出有功功率和无功功率存在的二倍频波动.文献[5]提出了一种双同步旋转坐标系控制策略可以抑制电网电压不平衡情况下引起的有功、无功功率的二倍频波动.文献[6]介绍了一种基于串联和并联结构的多微电网系统分层协调控制策略,该方法的分层控制能够实现串联和并联结构微电网的联络线功率调节指令的分配,得出电压的幅值差、频率差都在一定范围内,但是没有考虑整个微电网电压不平衡情况下的影响.文献[7-9]主要研究交直流微电网的构成和各种运行模式的基础上,提出电压分层协调控制策略.该分层控制策略通过检测直流电压的变化量来控制各电力电子变流器的工作方式,得到微电网内的有功功率平衡,但是该控制策略没有涉及到公共连接点电压的不平衡补偿.综上所述,当微电网公共连接点的电压不平衡时,微电网中的电压存在正序分量和负序分量,正序电压分量转化为直流分量,而负序电压分量则转化为二倍频分量.为了补偿微电网电压中的负序分量,本文提出一种基于分层控制的微电网电压不平衡补偿控制策略,分层控制的策略主要包括两层.在初级控制中,该层控制包括分布式电源和负荷控制,分布式电源通过逆变器输出的有功功率和无功功率存在的二倍频波动,功率中的二倍频波动引起公共连接点电压的不平衡.二级控制可补偿电压的不平衡造成影响.在此层控制中,要确保微电网和主电网之间的同步;基于改进解耦的双同步坐标系锁相环(IDDSRF-PLL),在IDDSRF-PLL中,采用了一个简单的一阶低通滤波器(low pass filter, LPF)对正序分量和负序分量进行解耦.最后,利用MATLAB/Simulink软件对电压不平衡的仿真结果表明,采用该方法的分层控制在微电网电压不平衡的情况下,能实现较好的动态补偿效果.

## 1 微电网的初级控制策略

### 1.1 不平衡电压下DG逆变器模型

三相逆变器的分布式电源电路结构如图1所示.图1中,  $V_{dc}$  为直流母线电压;  $i_a, i_b, i_c$  分别为逆变器的A、B、C三相输出电流;  $T_1 \rightarrow T_6$  为逆变器的开关器IGBT.分布式电源通过输出的电感  $L_a, L_b, L_c$  和电阻  $R_a, R_b, R_c$  连接到微电网公共连接点上,当微电网处于电压不平衡状态时,微电网电压和电流在静止  $\alpha\beta$  坐标系中,不仅存在以同步角频率  $\omega$  正向旋转的正序分量,还存在以角频率  $\omega$  反向旋转的负序分量.

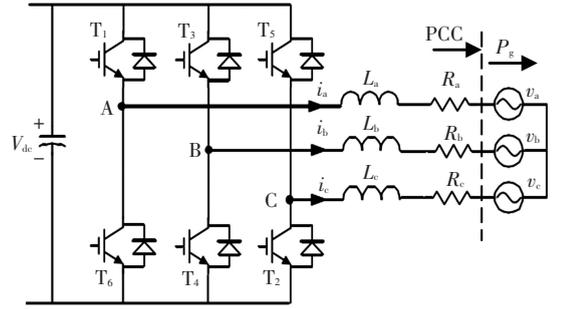


图1 分布式电源逆变器等效电路

公共连接点处的电压在同步  $dq$  旋转坐标系中的复矢量<sup>[10]</sup>, 可以表示为

$$V_{\alpha\beta} = e^{j\omega t} V_{dq+}^p + e^{-j\omega t} V_{dq-}^n \quad (1)$$

式中:  $V_{dq+}^p = V_{d+}^p + jV_{q+}^p$  为正序电压分量;  $V_{dq-}^n = V_{d-}^n + jV_{q-}^n$  为负序电压分量;  $\omega$  为微电网的同步角频率; 下标 +、- 分别为同步旋转坐标系中的正向和负向; 上标 p、n 分别为正、负序分量. 在正向同步旋转坐标系中可以表示为

$$V_{dq+} = V_{dq+}^p + V_{dq+}^n = V_{dq+}^p + e^{-j2\omega t} V_{dq-}^n \quad (2)$$

由式(2)可以看出,在正向同步旋转坐标系中,微电网电压不仅存在有正序直流分量,也存在有二倍频波动的负序交流分量. 在微电网的控制系统中,并网逆变器一般采用静止坐标下的数学模型可以表示为

$$U_{\alpha\beta} = V_{\alpha\beta} + L \frac{dI_{\alpha\beta}}{dt} + RI_{\alpha\beta} \quad (3)$$

当 PCC 处电压不平衡时,微电网的电压分量  $U_{\alpha\beta}, I_{\alpha\beta}$  均含有正、负序分量. 类似式(1)可以写成

$$\begin{cases} U_{\alpha\beta} = e^{j\omega t} U_{dq+}^p + e^{-j\omega t} U_{dq-}^n \\ I_{\alpha\beta} = e^{j\omega t} I_{dq+}^p + e^{-j\omega t} I_{dq-}^n \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $U_{dq+}^p = U_{d+}^p + jU_{q+}^p, U_{dq-}^n = U_{d-}^n + jU_{q-}^n$  分别为逆变器输出的正序电压分量、负序电压分量;  $I_{dq+}^p = I_{d+}^p + jI_{q+}^p, I_{dq-}^n = I_{d-}^n + jI_{q-}^n$  分别为并网逆变器输出的正序电流分量、负序电流分量. 联立式(1)、(3)、(4),可得到三相逆变器在两相同步旋转  $dq$  坐标系下的正序、负序复矢量表达式为

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

根据以上分析,当 PCC 处电压不平衡时,分布式电源并网逆变器在正序、负序两相同步旋转  $dq$  坐标系下的数学模型可以分别表示为

$$\begin{cases} U_{d+}^p = V_{d+}^p + RI_{d+}^p + L \frac{dI_{d+}^p}{dt} - j\omega LI_{q+}^p \\ U_{q+}^p = V_{q+}^p + RI_{q+}^p + L \frac{dI_{q+}^p}{dt} + j\omega LI_{d+}^p \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} U_{d-}^n = V_{d-}^n + RI_{d-}^n + L \frac{dI_{d-}^n}{dt} + j\omega LI_{q-}^n, \\ U_{q-}^n = V_{q-}^n + RI_{q-}^n + L \frac{dI_{q-}^n}{dt} - j\omega LI_{d-}^n. \end{cases} \quad (7)$$

## 1.2 不平衡电压下 DG 功率的数学模型

当微电网公共连接点的电压不平衡时,分布式电源并网逆变器输出的视在功率,可以表示为

$$S = P + jQ = \frac{3}{2} V_{\alpha\beta} I_{\alpha\beta}^* = \frac{3}{2} (e^{j\omega t} V_{dq+}^p + e^{-j\omega t} V_{dq-}^n) (e^{j\omega t} I_{dq+}^p + e^{-j\omega t} I_{dq-}^n)^* \quad (8)$$

将式(8)写成代数形式的瞬时有功功率和无功功率形式<sup>[11]</sup>,可以表示为

$$\begin{cases} P(t) = P_0 + P_{c2} \cos 2\omega t + P_{s2} \sin 2\omega t, \\ Q(t) = Q_0 + Q_{c2} \cos 2\omega t + Q_{s2} \sin 2\omega t. \end{cases} \quad (9)$$

其中,有功功率为

$$\begin{cases} P_0 = \frac{3}{2} (V_{d+}^p I_{d+}^p + V_{q+}^p I_{q+}^p + V_{d-}^n I_{d-}^n + V_{q-}^n I_{q-}^n), \\ P_{c2} = \frac{3}{2} (V_{d-}^n I_{d+}^p + V_{q-}^n I_{q+}^p + V_{d+}^p I_{d-}^n + V_{q+}^p I_{q-}^n), \\ P_{s2} = \frac{3}{2} (V_{q-}^n I_{d+}^p - V_{d-}^n I_{q+}^p - V_{q+}^p I_{d-}^n + V_{d+}^p I_{q-}^n). \end{cases} \quad (10)$$

无功功率为

$$\begin{cases} Q_0 = \frac{3}{2} (V_{q+}^p I_{d+}^p - V_{d+}^p I_{q+}^p + V_{q-}^n I_{d-}^n - V_{d-}^n I_{q-}^n), \\ Q_{c2} = \frac{3}{2} (V_{q-}^n I_{d+}^p - V_{d-}^n I_{q+}^p + V_{q+}^p I_{d-}^n - V_{d+}^p I_{q-}^n), \\ Q_{s2} = \frac{3}{2} (-V_{d-}^n I_{d+}^p - V_{q-}^n I_{q+}^p + V_{d+}^p I_{d-}^n + V_{q+}^p I_{q-}^n). \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $P_0$ 、 $Q_0$  分别为有功功率、无功功率的平均值;  $P_{c2}$ 、 $P_{s2}$  分别为有功功率的二倍频波动分量幅值;  $Q_{c2}$ 、 $Q_{s2}$  分别为无功功率的二倍频波动分量幅值. 从式(10)、(11)可以看出,当公共连接点处电压不平衡时,分布式电源并网逆变器的输出瞬时有功功率  $P(t)$  及无功功率  $Q(t)$ , 存在二倍频的波动. 因此,根据应用场合的不同,对于微电网电压不平衡情况下,分布式电源并网逆变器的控制目标有以下 3 种<sup>[12]</sup>.

1) 目标 1 为消除输出有功功率的二倍频波动, 即  $P_{c2} = P_{s2} = 0$ , 式(10)、(11)可以写成

$$\begin{cases} I_{d+}^{p*} = \frac{2}{3} \left[ \frac{P_0^* V_{d+}^p}{D_2} + \frac{Q_0^* V_{q+}^p}{D_1} \right], \\ I_{q+}^{p*} = \frac{2}{3} \left[ \frac{P_0^* V_{q+}^p}{D_2} - \frac{Q_0^* V_{d+}^p}{D_1} \right], \\ I_{d-}^{n*} = \frac{2}{3} \left[ -\frac{P_0^* V_{d-}^n}{D_2} + \frac{Q_0^* V_{q-}^n}{D_1} \right], \\ I_{q-}^{n*} = \frac{2}{3} \left[ -\frac{P_0^* V_{q-}^n}{D_2} - \frac{Q_0^* V_{d-}^n}{D_1} \right]. \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $D_1 = (V_{d+}^p)^2 + (V_{q+}^p)^2 - (V_{d-}^n)^2 - (V_{q-}^n)^2$ ;  $D_2 = (V_{d+}^p)^2 + (V_{q+}^p)^2 + (V_{d-}^n)^2 + (V_{q-}^n)^2$ ;  $P_0^*$  为逆变器输出有功功率平均值的给定;  $Q_0^*$  为逆变器输出无功功率平均值的给定.

根据文献[13]可知,  $P_0^*$  与直流母线电压平均分量有关. 当采用 PI 控制器对直流母线电压进行调节时, PI 控制器通过逆变器输出的有功功率直流分量可以表示为

$$P_0^* = [(K_{vp} + K_{vi}/s)(V_{dc}^* - V_{dc})] V_{dc} \quad (13)$$

式中  $K_{vp}$ 、 $K_{vi}$  分别为 PI 控制器的比例参数和积分参数.

2) 目标 2 为消除输出无功功率的二倍频波动, 即  $Q_{c2} = Q_{s2} = 0$ , 式(10)、(11)可以写成

$$\begin{cases} I_{d+}^{p*} = \frac{2}{3} \left[ \frac{P_0^* V_{d+}^p}{D_1} + \frac{Q_0^* V_{q+}^p}{D_2} \right], \\ I_{q+}^{p*} = \frac{2}{3} \left[ \frac{Q_0^* V_{q+}^p}{D_1} - \frac{Q_0^* V_{d+}^p}{D_2} \right], \\ I_{d-}^{n*} = \frac{2}{3} \left[ \frac{Q_0^* V_{d-}^n}{D_1} - \frac{Q_0^* V_{q-}^n}{D_2} \right], \\ I_{q-}^{n*} = \frac{2}{3} \left[ \frac{P_0^* V_{q-}^n}{D_1} + \frac{Q_0^* V_{d-}^n}{D_2} \right]. \end{cases} \quad (14)$$

式中  $P_0^*$  与  $Q_0^*$  所表示的含义与控制目标 1 中的一致.

3) 目标 3 为消除并网电流的负序分量, 即  $I_{d-}^{n*} = I_{q-}^{n*} = 0$ , 式(10)、(11)可以写成

$$\begin{cases} I_{d+}^{p*} = \frac{2}{3} \left[ \frac{P_0^* V_{d+}^p + Q_0^* V_{q+}^p}{(V_{d+}^p)^2 + (V_{q+}^p)^2} \right], \\ I_{q+}^{p*} = \frac{2}{3} \left[ \frac{P_0^* V_{q+}^p - Q_0^* V_{d+}^p}{(V_{d+}^p)^2 + (V_{q+}^p)^2} \right], \\ I_{d-}^{n*} = 0, \\ I_{q-}^{n*} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

## 1.3 双电流环控制器

由式(12)、(14)、(15)可知, 正序和负序给定电流中都只含有直流分量, 通常采用 PI 控制器, 可以实现对并网逆变器交流侧正序和负序电流的各自独立无静差控制, 从而可以实现完全抑制因微电网在 PCC 处由于电压不平衡所产生的直流母线电压的二倍振荡. 根据式(6)、(7), 可得到并网逆变器在两相旋转

$dq$  同步坐标系下的正序电流环前馈解耦控制算法为

$$\begin{cases} U_{d+}^{p*} = V_{d+}^p - (K_{ip} + K_{il}/s)(I_{d+}^{p*} - I_{d+}^p) + \omega_o LI_{q+}^p, \\ U_{q+}^{p*} = V_{q+}^p - (K_{ip} + K_{il}/s)(I_{q+}^{p*} - I_{q+}^p) - \omega_o LI_{d+}^p. \end{cases} \quad (16)$$

负序电流环前馈解耦控制算法可以表示为

$$\begin{cases} U_{d-}^{n*} = V_{d-}^n - (K_{ip} + K_{il}/s)(I_{d-}^{n*} - I_{d-}^n) - \omega_o LI_{q-}^n, \\ U_{q-}^{n*} = V_{q-}^n - (K_{ip} + K_{il}/s)(I_{q-}^{n*} - I_{q-}^n) + \omega_o LI_{d-}^n. \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $I_{d+}^{p*}$ 、 $I_{q+}^{p*}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴的正序电流给定;  $I_{d-}^{n*}$ 、

$I_{q-}^{n*}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴的负序电流给定;  $K_{ip}$ 、 $K_{il}$  分别为 PI 控制器的比例和积分系数;  $s$  为拉普拉斯变换因子;  $L$  为滤波电感。

综合以上分析,本文提出了微电网电压不平衡补偿的分层控制原理,如图2所示。当微电网公共连接点的电压不平衡时,双电流环控制器可以实现正序和负序电流的独立控制。此时,正负序电流控制指令中只含有直流分量,从而双电流环控制策略

能够在向电网三相电流中注入适当的负序电流分量来满足对直流母线电压的控制要求。实际运行中,分布式电源初级控制利用式(12)、(14)、(15)方法,采用双电流环的控制器可得到电流给定值,并且进行控制,但是微电网电压的负序分量仍然存在。为了完全消除直流母线电压的二倍频波动,要得到微电网在公共连接点平衡的电压,此时微电网中电压负序分量为零,因此考虑引入二级控制策略。

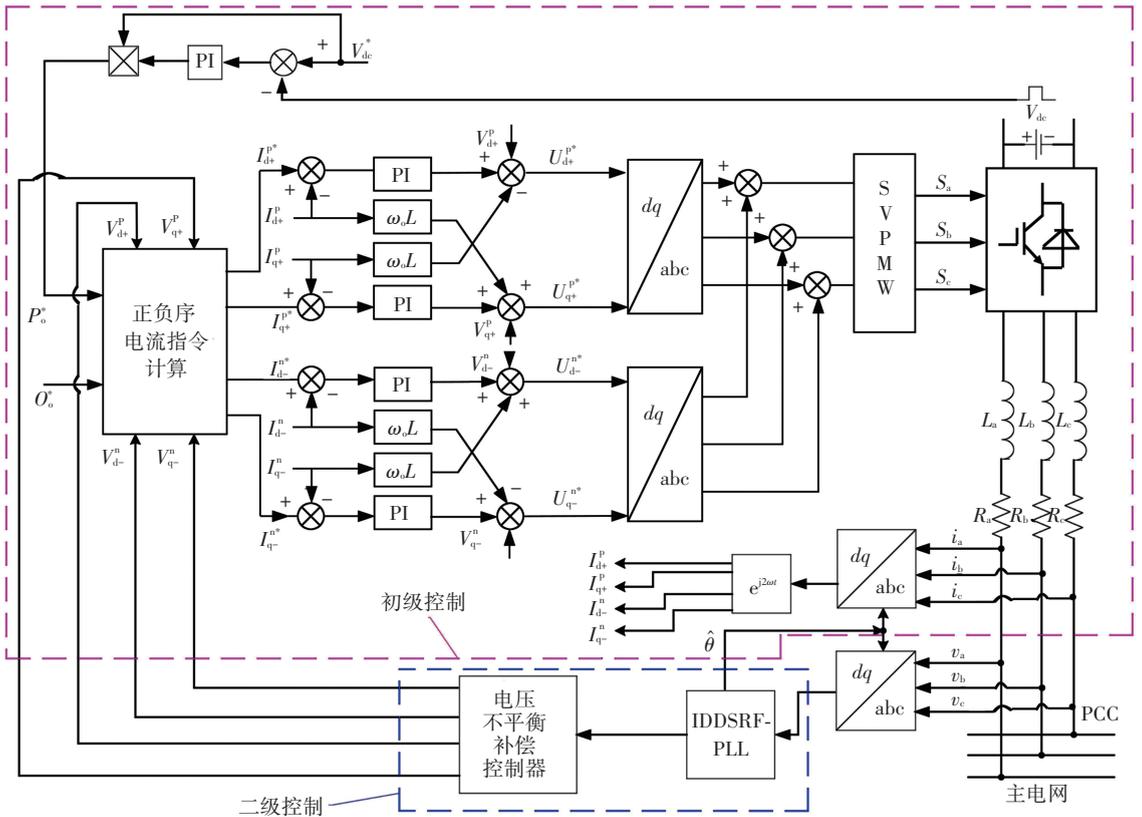


图2 微电网电压不平衡补偿的分层控制原理框图

## 2 电压不平衡补偿的二级控制策略

从图2可以看出,改进解耦的双同步坐标系锁相环和电压不平衡补偿控制器的关系,在本文中称之为二级控制。在正常运行条件下,微电网电压三相平衡且畸变较小,电压不平衡在允许范围之内,利用传统锁相环能准确的提取出电网电压相角,使微电网电压与电网电压保持同步。在微电网电压不平衡条件下,微电网中的电压存在正序分量和负序分量,正序电压分量转化为直流分量,负序电压分量转化为二倍频分量。为补偿微电网电压中的负序分量,此时必须采取适合于微电网的不平衡情况下的锁相环。本文提出一种负序分量补偿控制策略,结合改进解耦的双同步坐标系锁相环控制,确保并网电压无畸变且对称并网,从而保证了并网电能质量。下面介绍了改进解耦的双同步坐标系锁相环和电压不平衡补偿控制器的关系。

### 2.1 改进解耦的双同步坐标系锁相环建模

三相电网电压矢量分为正序分量和负序分量,将两个分量通过坐标变换分别对应以  $\hat{\omega}$  角速度逆时针旋转的  $(dq)^+$  同步坐标系和以  $-\hat{\omega}$  角速度顺时针旋转的  $(dq)^-$  同步坐标系<sup>[14]</sup>。

$$v_{s(dq^+)} = \begin{bmatrix} v_{sd^+} \\ v_{sq^+} \end{bmatrix} = [T_{dq^+}] v_{s(\alpha\beta)} = v_s^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \hat{\theta}) \\ \sin(\omega t - \hat{\theta}) \end{bmatrix} + v_s^- \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^{-1} - \hat{\theta}) \\ \sin(-\omega t + \varphi^{-1} - \hat{\theta}) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$v_{s(dq^-)} = \begin{bmatrix} v_{sd^-} \\ v_{sq^-} \end{bmatrix} = [T_{dq^-}] v_{s(\alpha\beta)} = v_s^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \hat{\theta}) \\ \sin(\omega t + \hat{\theta}) \end{bmatrix} + v_s^- \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^{-1} + \hat{\theta}) \\ \sin(-\omega t + \varphi^{-1} + \hat{\theta}) \end{bmatrix}. \quad (19)$$

若  $\hat{\theta} = \omega t, \cos(\omega t - \hat{\theta}) \approx 1 - ((\omega t - \hat{\theta})^2/2), \sin(\omega t - \hat{\theta}) \approx \omega t - \hat{\theta}$ , 则式(18)、(19)可以写为

$$\begin{bmatrix} v_{sd+1} \\ v_{sq+1} \end{bmatrix} \approx v_s^{+1} \begin{bmatrix} 1 - ((\omega t - \hat{\theta})^2/2) \\ \omega t - \hat{\theta} \end{bmatrix} + v_s^{-1} \begin{bmatrix} \cos(-2\omega t + \varphi^{-1}) \\ \sin(-2\omega t + \varphi^{-1}) \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} v_{sd-1} \\ v_{sq-1} \end{bmatrix} \approx v_s^{+1} \begin{bmatrix} \cos(2\omega t) \\ \sin(2\omega t) \end{bmatrix} + v_s^{-1} \begin{bmatrix} \cos(\varphi^{-1}) \\ \sin(\varphi^{-1}) \end{bmatrix}. \quad (21)$$

由式(20)、(21)可以看出,在正序  $(dq)^+$  坐标系下,分布式电源逆变器输出电压的正序分量变成了直流量,负序分量则变为频率为  $2\omega$  的交流分量;在负序  $(dq)^-$  坐标系下,分布式电源逆变器输出电压的负序分量为直流量,而正序分量为频率为  $2\omega$  的交流分量. 根据式(20)、(21)可得

$$\begin{bmatrix} v_{sd+1} \\ v_{sq+1} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} v_{sd+1}^* \\ v_{sq+1}^* \end{bmatrix} + v_{sd-1}^- \begin{bmatrix} \cos(2\hat{\theta}) \\ -\sin(2\hat{\theta}) \end{bmatrix} + v_{sq-1}^- \begin{bmatrix} \sin(2\hat{\theta}) \\ \cos(2\hat{\theta}) \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} v_{sd-1} \\ v_{sq-1} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} v_{sd-1}^* \\ v_{sq-1}^* \end{bmatrix} + v_{sd+1}^- \begin{bmatrix} \cos(2\hat{\theta}) \\ \sin(2\hat{\theta}) \end{bmatrix} + v_{sq+1}^- \begin{bmatrix} -\sin(2\hat{\theta}) \\ \cos(2\hat{\theta}) \end{bmatrix}. \quad (23)$$

式中  $\hat{\theta}$  为锁相环的输出角度. 通过式(22)、(23)可解耦得到正序电压、负序电压中的直流分量,从而抑制微电网电压不平衡对锁相环造成的影响. 根据式(22)、(23),可绘出改进解耦的双同步坐标系锁相环(IDDSRF-PLL)原理框图,如图3所示.

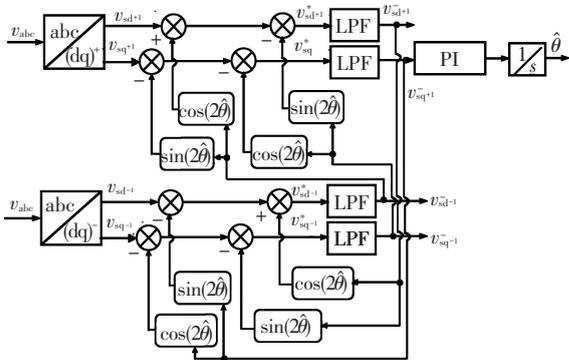


图3 IDDSRF-PLL 原理框图

由图3可知,当微电网公共连接点处电压不平衡时,在正序  $(dq)^+$  坐标系下的  $q$  轴,分布式电源逆变器输出的电压  $v_{sq+1}$  不仅含有正序分量的直流部分,同时也含有负序分量的交流部分,即  $v_{sq+1} \neq 0$ .

### 2.2 电压不平衡补偿控制器

本文提出一种负序分量补偿控制策略,结合 IDDSRF-PLL 控制. 在图3中,改进解耦的双同步坐标系锁相环输出的正序和负序分量电压分别为

$v_{sd+1}^-, v_{sq+1}^-, v_{sd-1}^-$  和  $v_{sq-1}^-$ , 可用于计算电压不平衡度. 定义电压不平衡度(voltage unbalance factor)为负序电压与正序电压的比值  $K_{VUF}^{[15]}$ , 即

$$K_{VUF} = \frac{V_s^-}{V_s^+} \times 100\% = \frac{\sqrt{(v_{sd-1}^-)^2 + (v_{sq-1}^-)^2}}{\sqrt{(v_{sd+1}^-)^2 + (v_{sq+1}^-)^2}} \times 100\%. \quad (24)$$

由式(24)可得如图4所示的电压不平衡补偿控制器的结构框图.

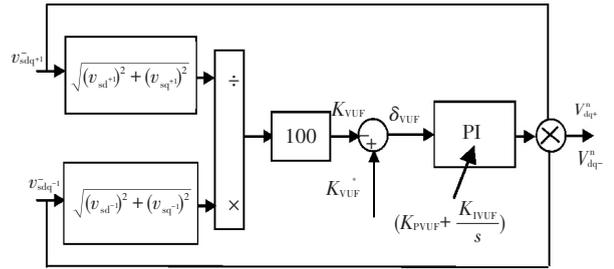


图4 电压不平衡补偿控制器的结构框图

由图4可以看出,将  $K_{VUF}$  与  $K_{(VUF)}^*$  参考值进行比较,得到电压不平衡度偏差为  $\delta_{VUF}$ . 这个偏差值被发送到电压不平衡补偿控制器. 与电压不平衡补偿控制器 PI 比较之后,输出的负序电压分量分别为  $V_{d-}^n$  和  $V_{q-}^n$ , 然后负序电压分量到初级控制分布式电源的控制器. 通过双电流环控制器可得到直流母线电压的二倍频波动部分为零. 从而抑制了三相电压不平衡的影响,同时能够精确获得微电网在公共连接点平衡的电压.

### 3 仿真结果与分析

为了验证上述控制策略的正确性和有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建了仿真模型,仿真模型如图5所示.

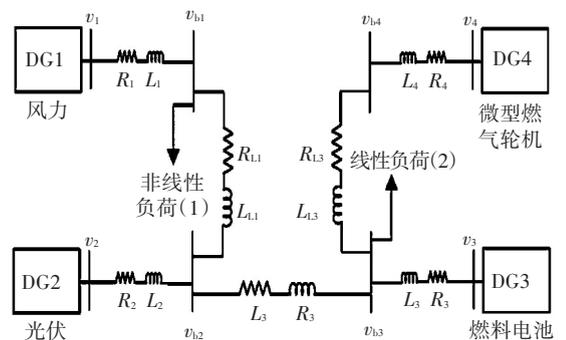


图5 系统仿真模型

图5系统中主电路参数:电网电压为  $V_g = 380$  V; 电网频率为  $f_g = 50$  Hz; 直流电压为  $V_{dc} = 650$  V; 电感为  $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 0.35$  mH; 电阻为  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0.03$   $\Omega$ ; 线路电阻为  $R_{L1} = 0.23$   $\Omega$ ,  $R_{L2} = 0.35$   $\Omega$ ,  $R_{L3} = 0.23$   $\Omega$ ; 线路电感为  $L_{L1} =$

318  $\mu\text{H}$ ,  $L_{L2} = 1\ 487\ \mu\text{H}$ ,  $L_{L3} = 318\ \mu\text{H}$ . 负荷参数:非线性负荷(1)为三相不可控整流桥带纯阻性负荷  $R = 8\ \Omega$ , 整流桥进线电感  $L = 2\ \text{mH}$ ;线性负荷(2)为  $P = 15\ \text{kW}$ ,  $Q = 7.6\ \text{kVar}$ . 控制器参数:逆变器开关频率为3 kHz;电压外环为  $K_{vP} = 0.35$ ,  $K_{vI} = 400$ ;电流内环为  $K_{iP} = 0.7$ ,  $K_{iI} = 100$ ;电压补偿为  $K_{PVUF} = 0.5$ ,  $K_{IVUF} = 7$ ;IDDSRF-PLL 分别为  $\tau = 80\ \text{ms}$ ,  $\omega_f = 6\ \text{kHz}$ ,  $K_{pPLL} = 150$ ,  $K_{iPLL} = 10^3$ . PCC 处输出的有功功率和无功功率如图 6、7 所示.

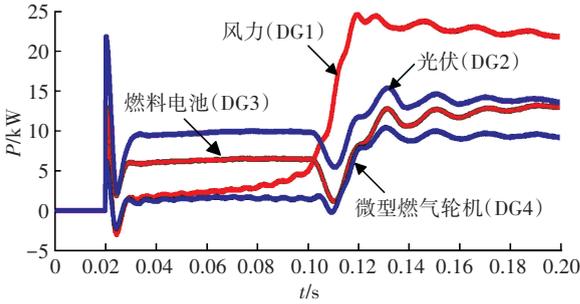


图 6 PCC 处输出的有功功率

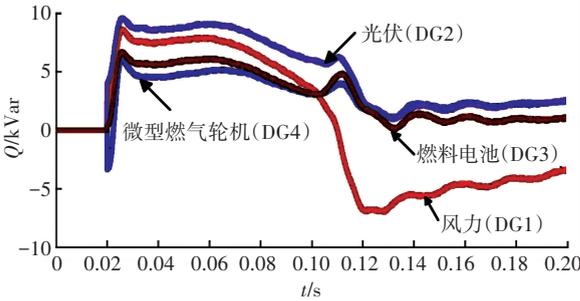


图 7 PCC 处输出的无功功率

通过图 6、7 中的仿真结果可以得出,在  $t = 0.02\ \text{s}$  之前,将微电网和主电网进行并网,PCC 处还没有输出功率;在  $t = 0.02\ \text{s}$  之后,PCC 处输出的各有功功率:DG1 为 3 kW, DG2 为 10 kW, DG3 为 5 kW, DG4 为 2 kW;PCC 处输出的各无功功率:DG1 为 8 kVar, DG2 为 9 kVar, DG3 为 5 kVar, DG4 为 4 kVar.  $dq$  坐标下电流的正序分量和负序分量如图 8、9 所示.

通过图 8、9 中的仿真结果可以得出,在正反转同步轴系下,经过陷波滤波的  $dq$  轴分量均应为直流,其中  $I_{d+}^p$  和  $I_{q+}^p$  分别表示该电流  $d$  轴和  $q$  轴的正序分量;  $I_{d-}^n$  和  $I_{q-}^n$  分别表示该电流  $d$  轴和  $q$  轴的负序分量.

频率响应如图 10 所示,包括电网频率为  $f_g$ 、微电网频率为  $f_{MG}$ 、微电网与主电网之间的同步频率输出偏差为  $\Delta f$ . 并网后,PCC 处的电压和相角如图 11、12 所示,在  $0.02 \sim 0.1\ \text{s}$  之间均有不平衡量. 根据 IEEE 1547 标准,对于容量为  $(0 \sim 500\ \text{kVA})$  的分布式电源,进行并网时,允许频率偏差为  $\pm 0.3\ \text{Hz}$ , 允

许电压偏差为  $\pm 10\%$  和相角偏差为  $\pm 20^\circ$ . 另外,微电网接入主电网技术规定要求微电网能够承受的电压不平衡度  $K_{VUF}$  最大 4% 的不平衡电网电压<sup>[16]</sup>,如图 13 所示.

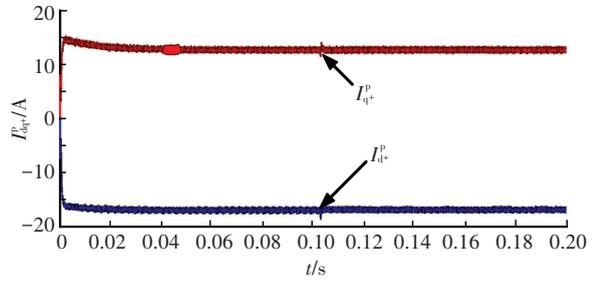


图 8 dq 坐标下正序电流

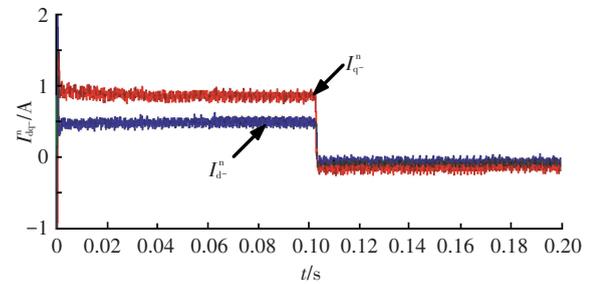


图 9 dq 坐标下负序电流

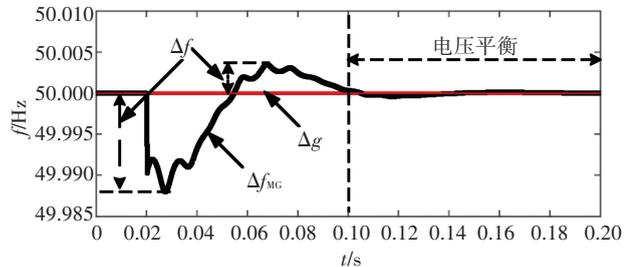


图 10 频率响应

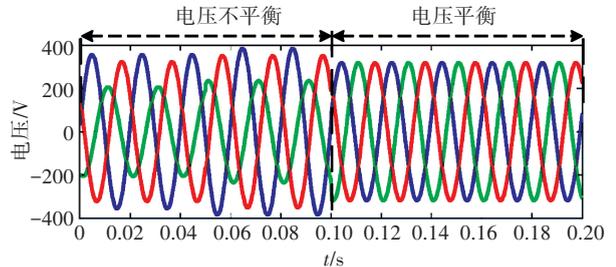


图 11 PCC 处输出电压波形

因此,由图 10~13 中的仿真结果可以证明,采用本文的方法得出的频率偏差、电压偏差、相角偏差和  $K_{VUF}$  ( $< 4\%$ ) 都在允许范围内. 在  $t = 0.1\ \text{s}$  时刻负荷变化, PCC 处输出的各有功功率:DG1 为 22 kW, DG2 为 15 kW, DG3 为 13 kW, DG4 为 8 kW;PCC 处输出的各无功功率:DG1 为负值, DG2 为 3 kVar, DG3 为 2 kVar, DG4 为 1 kVar. 如图 6、7 所示,此时, PCC 处输出电压不平衡度  $K_{VUF} \approx 0$ ,如图 13 所示, PCC 两侧采集到的频率都为 50 Hz, PCC 两侧电压都为 380 V,电压相角为  $\hat{\theta} = \omega t$  见图 10~12. 因此,通

过仿真结果可以得出,并网后,非线性负荷(或者负荷变化)时电网电压仍保持平衡和稳定。

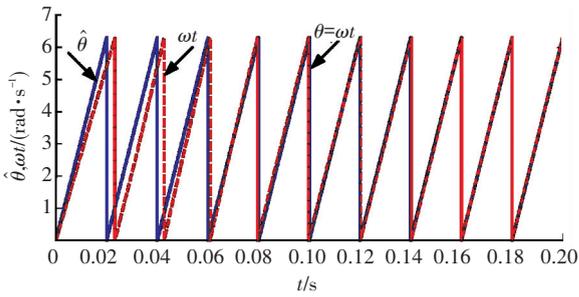


图 12 微电网与主电网的同步相角

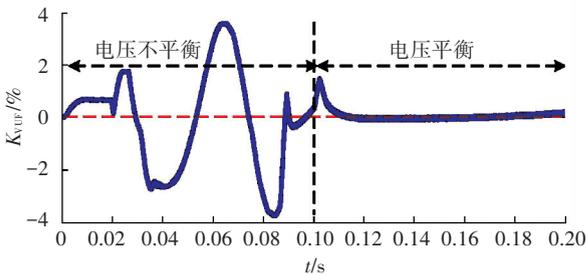


图 13 PCC 处输出电压不平衡度

## 4 结 论

1) 针对微电网中的分布式电源并网带来的电压不平衡问题,提出了基于分层控制的微电网电压不平衡补偿控制策略. 利用改进解耦的双同步坐标系锁相环,实现正负序分量的独立控制,构建了电压不平衡补偿控制器. 不仅提高了系统供电可靠性,而且保证了微电网各种运行方式的无缝切换。

2) 在负荷变化时所造成 PCC 处微电网电压不平衡的情况下,微电网将保持系统电压平衡. 同时,频率、电压相角、电压不平衡度  $K_{VUF}$  都在允许范围内。

3) 通过 MATLAB/simulink 仿真结果表明,该分层控制在微电网电压不平衡的情况下,能实现较好的动态补偿效果。

## 参考文献

[1] 郭小强,张学,卢志刚,等.不平衡电网电压下光伏并网逆变器功率/电流质量协调控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(3):346-353.  
 [2] 罗安,欧剑波,唐杰,等.补偿配电网电压不平衡的静止同步补偿器控制方法研究[J].中国电机工程学报,2009,29(6):55-60.  
 [3] GRAOVAC D, KATIC V A, RUFER A. Power quality problems compensation with universal power quality conditioning system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 968-976.

[4] 吴在军,杨雷雷,胡敏强,等.改善微网电能质量的有源电能质量调节器研究[J].电网技术,2012,36(7):67-73.  
 [5] 肖辉,刘会金.不平衡电网电压下 DFIG 双 SRF 控制策略[J].电力自动化设备,2013,33(5):37-42.  
 [6] 周念成,金明,王强钢,等.串联和并联结构的多微网系统分层协调控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(12):13-18.  
 [7] LU Xiaonan, GUERRERO J M, SUN Kai, et al. Hierarchical control of parallel AC-DC converter interfaces for hybrid microgrids[J].IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 683-691.  
 [8] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: a general approach toward standardization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.  
 [9] PECAS LOPES J A, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation [J].IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.  
 [10] YIN Bo, ORUGANTI R, PANDA S K, et al. An output-power-control strategy for a three-phase PWM rectifier under unbalanced supply conditions [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 2140-2151.  
 [11] ZHOU Yi, BAUER P, FERREIRA J A, et al. Operation of grid-connected DFIG under unbalanced grid voltage condition [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 240-246.  
 [12] HU Jiabing, HE Yikang. Modeling and control of grid-connected voltage-sourced converters under generalized unbalanced operation conditions [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3): 903-913.  
 [13] 徐海亮,章玮,胡家兵,等.电网电压不平衡及谐波畸变时基波电压同步信号的检测 [J].电力系统自动化,2012,36(5):90-95.  
 [14] RODRIGUEZ P, POU J, BERGAS J, et al. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-592.  
 [15] VANDOORN T L, DE KOONING J D M, VAN DE VYVER J, et al. Three-phase primary control for unbalance sharing between distributed generation units in a microgrid [J]. Energies, 2013, 6(12): 6586-6607.  
 [16] 胡家兵,贺益康,王宏胜,等.不平衡电网电压下双馈感应发电机网侧和转子侧变流器的协同控制 [J].中国电机工程学报,2010,30(9):97-104.

(编辑 魏希柱)