

微电网的电压质量控制方法

杨旭生¹, 陈伟², 吴丽珍²

(1. 兰州石化职业技术学院电子电气工程学院, 兰州 730060;
2. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要: 为了解决由于不平衡负载的接入而引起的电压质量问题, 从而使微电网公共耦合点的电压质量得到改善, 提出了电压质量的二次控制方法。基于 $\alpha\beta$ 坐标系, 采用分层控制策略, 对微电网的电压、频率、功率进行补偿与修正。采用分层控制中的一次控制对微电网的基本参数进行跟踪与控制, 通过调节参数来维持微电网的稳定运行。采用二次控制分别对微电网电压幅值、频率及无功功率偏差进行修正, 并对不平衡电压和功率进行补偿与均分。最后通过仿真模型的验证, 证明所提控制方法能很好地对电压质量进行改善。

关键词: 微电网; 功率均分; 电压偏差; 频率偏差; 公共耦合点

中图分类号: TM727 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8930(2018)04-0063-07

DOI: 10.3969/j.issn.1003-8930.2018.04.010

Voltage Quality Control Method for Microgrid

YANG Xusheng¹, CHEN Wei², WU Lizhen²

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Lanzhou Petrochemical Polytechnic, Lanzhou 730060, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To solve the voltage quality problems caused by unbalanced load access and improve the voltage quality at the point of common coupling for microgrid, a secondary control method for voltage quality is proposed in this paper. Based on an $\alpha\beta$ coordinate system, the voltage, frequency, and power of microgrid are compensated and corrected using a hierarchical control strategy. The basic parameters of microgrid are tracked and controlled by the primary control, and the stable operation of microgrid is maintained by adjusting those parameters. The secondary control is used for correcting the voltage amplitude, frequency, and reactive power deviation of microgrid, respectively, as well as for the compensation and sharing of unbalanced voltage and power. Finally, the verification of the simulation model proves that the proposed control method can improve the voltage quality effectively.

Key words: microgrid; power sharing; voltage deviation; frequency deviation; point of common coupling (PCC)

随着微电网的大规模发展, 研究微电网的结构、运行控制、故障保护及微电网的应用不断扩大。微电网由于自身的特点以及三相不对称负荷、非线性负荷的接入, 导致微电网中出现电压不平衡、跌落和谐波等问题^[1-2], 使得微电网与配电网的公共耦合点 PCC (point of common coupling) 处的电压质量变差, 直接影响微电网内各分布式电源 DG (distributed generation) 的稳定运行及 PCC 的供电^[3]。

为此, 学者们提出了很多方法, 文献[3]提出了分布补偿方法, 分别对电能质量的各个问题一一补偿, 进而实现全面补偿, 但该补偿实现较难, 并

且系统庞大。为了实现控制的精确性, 文献[4-5]提出集中式二次控制策略, 但是集中式二次控制器为了获得一致的频率、电压幅值和无功功率, 每个 DG 都需要与其他所有的 DGs 交换信息。随着 DG 数量的增多, 数据交换量也会增加, 容易造成通信阻塞、通信链路故障等问题, 可能会造成很大的误差。

针对上述问题, 本文基于 $\alpha\beta$ 坐标系下提出微电网电压质量控制方法, 该方法将微电网系统分为一次控制层、二次控制层和三次控制层。其中, 一次控制器进行下垂控制、虚拟阻抗控制以及电压电流控制, 来实现参数的基本跟踪控制; 二次控制通

收稿日期: 2017-08-23; 修回日期: 2018-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51267012); 甘肃省科技支撑工业计划资助项目(1504GKCA033)

过采集 PCC 的电压进行电压质量分析,对电压不平衡进行补偿,有功、无功功率的均分,并将微电网电压、频率、无功功率进行修正,通过各个控制环节的协调,最后实现 PCC 的电压质量的全局补偿。三次控制主要实现微网的全局优化和功率管理^[6],完成目标的设定,全局信息的收集与优化。三次控制不在本文的设计范围内,不再详述。

1 控制结构

针对三相三线制微电网系统 PCC 点的电压质量问题,基于 $\alpha\beta$ 坐标系,采用分层控制理论,通过二次控制方法精确对 PCC 点的电压幅值和频率进行修正、对不平衡电压进行补偿、对有功及无功功率进行均分,其控制结构如图 1 所示。三相逆变器

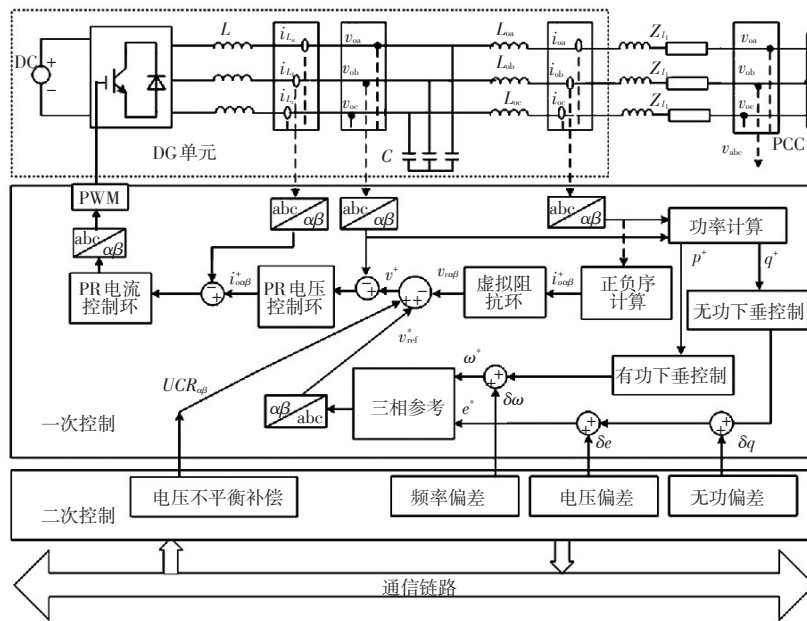


图 1 DG 控制结构

Fig.1 Control structure of DG

主要由分布式直流电源,三相全桥逆变电路和 LCL 滤波器组成。 Z_{li} 为 DG1 到 PCC 点的线路阻抗。

2 一次控制

为保证微电网在电压电流存在畸变时,分布式处理不受影响。在一次控制中采用基于 c 坐标系的基频正序有功/频率下垂控制和正序无功/电压下垂控制,基于正序电流的虚拟阻抗控制,消除畸变的电压环和电流环准比例谐振控制器设计,得到的控制信号通过 SVPWM 送入逆变器,通过控制逆变器来控制输出的电压质量。

2.1 功率计算

基于瞬时功率理论^[7],计算有功无功的瞬时值,计算公式为

$$p = v_{\alpha\alpha}i_{\alpha\alpha} + v_{\alpha\beta}i_{\alpha\beta} \tag{1}$$

$$q = v_{\alpha\beta}i_{\alpha\alpha} - v_{\alpha\alpha}i_{\alpha\beta} \tag{2}$$

式中: $v_{\alpha\alpha}$ 和 $v_{\alpha\beta}$ 为 $\alpha\beta$ 下的两相基波电压; $i_{\alpha\alpha}$ 和 $i_{\alpha\beta}$ 为 $\alpha\beta$ 下的两相基波电流。瞬时有功功率 p 和瞬时无功功率 q 包含了直流分量和交流分量。直流分量即

为基波正序,因此,基波正序有功功率 P^+ 和无功功率 Q^+ 可通过低通滤波器滤除 p 和 q 的交流分量得到,且 P^+ 和 Q^+ 将用于下垂特性计算中。

由于在仿真中变换模块为恒幅值模块,所以需要在原来的基础上乘 1.5,使得变换前后的功率保持不变,对算得的有功无功功率进行低通滤波即可得到所需的功率。

2.2 下垂控制

图 1 由于电压不平衡所引起的正负序分量,对正负序分量进行分离计算瞬时有功、无功功率,瞬时功率经过低通滤波器,得到的基波有功功率及无功功率经过下垂控制的表达式^[8]为

$$\begin{cases} P^+ \approx \frac{EV}{X} \sin \varphi \\ Q^+ \approx \frac{EV \cos \varphi - V^2}{X} \end{cases} \tag{3}$$

式中: V 为逆变器输出电压; E 为母线电压; φ 为逆变器输出电压与母线电压相位差; X 为线路感抗。有功功率 P^+ 主要取决于逆变器输出电压与母线电压相位差,无功功率 Q^+ 主要取决于逆变器输出电压

幅值 V 。又因为电压相角差和角频率 ω 之间满足关系: $\omega = d\varphi/dt$ 。因此,可以采用 PQ 下垂控制法,通过调节有功功率来改变输出角频率,进而实现电压相角差的控制;通过调节无功功率来实现电压幅值的控制。

式(3)中,如果 E 和 V 之间的相位差很小时,有功功率受功率角 φ 的影响,无功功率取决于电压幅值的差异。因此,频率和电压幅值可表示为

$$\begin{cases} \omega_i = \omega^* - k_p P^* \\ E_i = E^* - k_q Q^* \end{cases} \quad (4)$$

式中: E^* 、 ω^* 为参考电压幅值、参考电压相角; k_p 为下垂有功比例系数; k_q 为下垂无功比例系数。

2.3 虚拟负阻抗

传统的电压/无功下垂控制基于交流潮流理论,认为只有电源间的阻抗满足 $X \gg R$ 的条件,无功出力才主要受到电压幅值控制,而在低压微电网中该条件难以保证^[9]。因此,本文在逆变器控制单元中加入虚拟负阻抗环节,以补偿线路阻抗大小不一致而造成的无功出力不均。用虚拟负电阻抵消一部分线路电阻,从而在同样的效果下,减小虚拟阻抗的取值,提高电压质量。而且,虚拟负阻抗没有功率损耗,不会减少效率,使得下垂控制更稳定。其基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的设计方程可表示为

$$v_{v\alpha} = R_v i_{\alpha}^+ - L_v \omega i_{\alpha\beta}^+ \quad (5)$$

$$v_{v\beta} = R_v i_{\beta}^+ + L_v \omega i_{\alpha\beta}^+ \quad (6)$$

式中: R_v 、 L_v 为虚拟电阻、电感; $i_{\alpha\beta}^+$ 为 α 轴的基波正序

输出电流; i_{β}^+ 为 β 轴的基波正序输出电流; $v_{v\alpha}$ 为 α 轴的虚拟阻抗输出电压; $v_{v\beta}$ 为 β 轴的虚拟阻抗输出电压。

2.4 电压电流环控制

因为基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的电压和电流为交流分量,所以用准比例谐振 PR (proportional resonance) 控制器来进行电压、电流误差信号控制。通过 PR 控制器,使系统在谐振频率处实现零稳态误差^[10]。PR 电压、电流控制器传递函数为

$$G_V(s) = k_{pV} + \frac{2k_{rV} \omega_{cV} s}{s^2 + 2\omega_{cV} s + \omega_0^2} \quad (7)$$

$$G_I(s) = k_{pI} + \frac{2k_{rI} \omega_{cI} s}{s^2 + 2\omega_{cI} s + \omega_0^2} \quad (8)$$

式中: k_{pV} 、 k_{pI} 分别为电压、电流控制系数; k_{rV} 、 k_{rI} 分别为电压、电流谐振增益; ω_{cV} 、 ω_{cI} 分别为电压、电流截止频率; ω_0 为固定频率,取 100π 。

将得到的三相基波电流 $i_{\alpha\beta}^*$ 与检测到的三相滤波电感电流 $i_{L\alpha\beta}$ 相减得到电流误差,将其送入电流内环进行控制,结合直流侧电压 U_{dc} ,在空间矢量脉宽调制 SVPWM (space vector pulse width modulation) 的调节下,得到逆变器开关驱动信号,从而使逆变器在电压、电流双闭环控制下,输出额定正弦波电压。

2.5 一次控制系统分析

对一次控制方法的研究,根据对称分量理论,不平衡的电力系统可以按照正序和负序平衡的系统来分析,单相正序模型控制系统^[11]如图 2 所示。

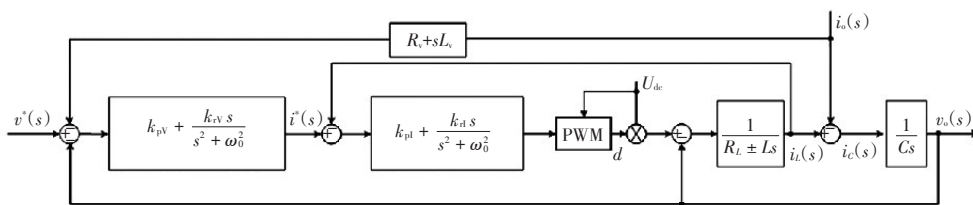


图 2 主电路和正序控制系统

Fig.2 Main circuit and positive-sequence control system

在该系统中,取 SVPWM 的传递函数为 1,其可表示为

$$v_o(s) = G(s)v^*(s) - Z_o(s)i_o(s) \quad (9)$$

$$\begin{cases} G(s) = \frac{G_V(s)G_I(s)}{LCs^2 + R_LCs + G_I(s)Cs + G_V(s)G_I(s) + 1} \\ Z_o(s) = Z_o'(s) + Z_v(s) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $G(s)$ 、 $Z_o(s)$ 分别为闭环控制系统的传递函数和输出阻抗; R_L 为线路电阻; $Z_v(s)$ 为虚拟阻抗。

则有

$$Z_o'(s) = \frac{R_L + Ls + G_I(s)}{LCs^2 + R_LCs + G_I(s)Cs + G_V(s)G_I(s) + 1} \quad (11)$$

上述公式及推理都是基于正序情况,要推递负序只需将 s 变为 $-s$ 即可。公式中的参数见表 1 和表 2,得到的系统闭环传递函数和输出阻抗的波特图如图 3 和图 4 所示。

图 3 为传递函数 $G(s)$ 的波特图,分别代表幅值和相位响应曲线。在幅值相应曲线中,正、负序幅

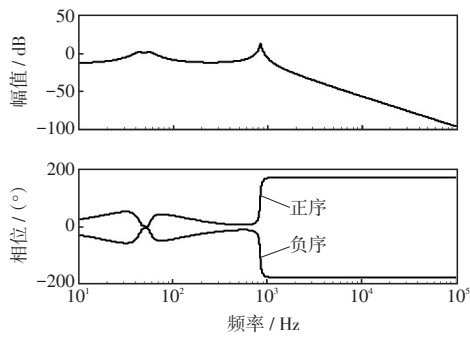
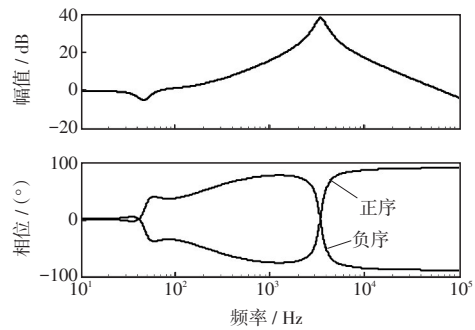


图3 正序和负序闭环传递函数波特图

Fig.3 Bode diagram of positive- and negative-sequence closed-loop transfer functions

值响应曲线重合;在相位响应曲线中,正、负序相位相反,符合实际情况。闭环传递函数在50 Hz处的幅值为1,正、负序相位角都为0,保证了系统能够跟踪电压的参考值。

图4为输出阻抗的幅频响应。由图可知,正序和负序的相位相反,正、负序在基波频率处的幅值增益很小,因为虚拟阻抗只针对正序起作用。



4 正序和负序输出阻抗波特图

Fig.4 Bode diagram of positive- and negative-sequence output impedances

3 二次控制

3.1 电压不平衡补偿

二次控制器将PCC的控制信号发送到DGs的一次控制器,作为电压参考,使得微电网中PCC电压不平衡度达到设定值。分布式二次控制器用于计算电压不平衡补偿向量UCR(unbalance compensation reference),其原理如图5所示。

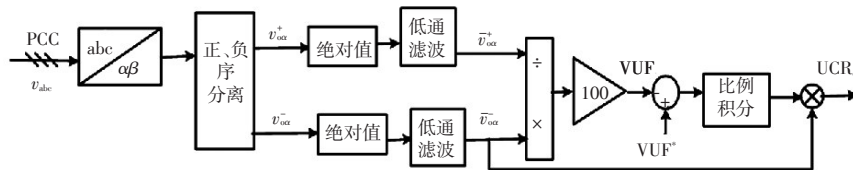


图5 电压不平衡补偿计算原理

Fig.5 Calculation principle of voltage unbalance compensation

图5中在 $\alpha\beta$ 坐标系下,采集主电路PCC的电压 v_{abc} ,对其进行正、负序提取得到正序和负序输出电压 $v_{\alpha+}^+$ 、 $v_{\alpha-}^-$,取绝对值,并经过低通滤波器LPF(low-pass filter),提取到PCC的正负序平均电压,低通滤波器LPF传递函数为

$$LPF = \frac{\omega_{cut}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{cut}s + \omega_{cut}^2} \quad (12)$$

式中, ω_{cut} 和 ζ 为滤波器的截止频率和阻尼比, $\zeta = 0.7$, $\omega_{cut} = 4\pi \text{ rad/s}$ 。

根据文献[12],电压不平衡度VUF(voltage unbalance factor)可定义为负序电压分量与正序电压分量之比,其公式为

$$VUF = \frac{\bar{v}_{\alpha-}^-}{\bar{v}_{\alpha+}^+} \times 100\% = \frac{|\bar{v}_{\alpha-}^-| LPF}{|\bar{v}_{\alpha+}^+| LPF} \times 100\% \quad (13)$$

式中, $\bar{v}_{\alpha+}^+$ 、 $\bar{v}_{\alpha-}^-$ 为PCC正、负序电压的平均值。设电压不平衡度参考值 $VUF^* = 0.5\%$,计算实际的VUF,与设定值作比较,经过PI控制器,最终得到 UCR_{α} 为

$$UCR_{\alpha} = (VUF^* - VUF)k_P k_I \bar{v}_{\alpha-}^- \quad (14)$$

式中, $\bar{v}_{\alpha-}^-$ 为 α 轴的负序电压; UCR_{α} 为在 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压不平衡补偿系数,由通信网络送到DGs本地控制器,作为补偿量进行不平衡补偿。

3.2 电压、频率及无功功率控制

在一次控制中,可以通过下垂控制来实现电压、频率的控制,但是一次控制中的电压、频率、无功功率同样存在偏差。为此,本文通过二次控制,对电压、频率和无功功率进行二次控制,来实现电压、频率和无功的偏差修正,最大限度地减少影响微电网系统稳定性的因素,其控制图如图6所示。

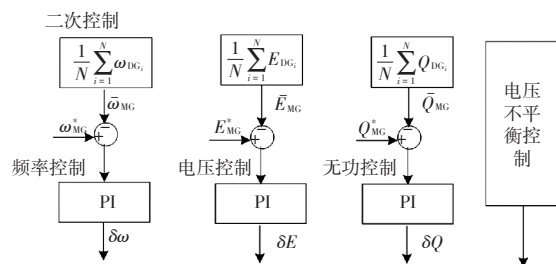


图6 二次控制

Fig.6 Secondary control

在二次控制中,将微电网的分布式电源的平均输出频率 $\bar{\omega}_{MG}$ 、电压幅值 \bar{E}_{MG} 和无功功率 \bar{Q}_{MG} 与其参考值 ω_{MG}^* 、 E_{MG}^* 及 Q_{MG}^* 进行比较,经过PI控制器进行偏差的消除,最后得到频率偏差 $\delta\omega$ 、电压偏差 δE 和无功功率偏差 δQ 。将这些偏差值反馈一次控制中,根据分布式电源的控制器,使分布式电源的频率、电压和无功功率幅值达到一个稳定值,其具体表示如下^[13]。

(1)微电网的频率偏差 $\delta\omega$ 表示为

$$\delta\omega = k_{pf}(\omega_{MG}^* - \bar{\omega}_{MG}) + k_{if} \int (\omega_{MG}^* - \bar{\omega}_{MG}) dt$$

$$\bar{\omega}_{MG} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_{DG_i} \quad (15)$$

式中: k_{pf} 、 k_{if} 为二次控制中频率的PI控制参数; $\bar{\omega}_{MG}$ 为*i*个MG的频率平均值; ω_{DG_i} 为第*i*个DG的实际输出频率。

(2)微电网的电压偏差 δE 表示为

$$\delta E = k_{pE}(E_{MG}^* - \bar{E}_{MG}) + k_{iE} \int (E_{MG}^* - \bar{E}_{MG}) dt$$

$$\bar{E}_{MG} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{DG_i} \quad (16)$$

式中: k_{pE} 、 k_{iE} 为二次控制中电压的PI控制参数; \bar{E}_{MG} 为*i*个MG的电压平均值; E_{DG_i} 为第*i*个DG的实际输出电压幅值。

(3)微电网的无功偏差 δQ 表示为

$$\delta Q = k_{pQ}(Q_{MG}^* - \bar{Q}_{MG}) + k_{iQ} \int (Q_{MG}^* - \bar{Q}_{MG}) dt$$

$$\bar{Q}_{MG} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{DG_i} \quad (17)$$

式中: k_{pQ} 、 k_{iQ} 为二次控制中无功的PI控制参数; \bar{Q}_{MG} 为*i*个MG的无功的平均值; Q_{DG_i} 为第*i*个DG的实际输出无功功率。

根据微电网不平衡控制框图得,式(15)~式(17)的二次电压、频率及无功偏差控制结合到下垂控制中,使得频率和电压幅值更精确、更有效,并根据目标精确地进行功率的均分。因此,结合上述方法,可表示为

$$\omega_i = \omega^* - k_p P^+ + \delta\omega$$

$$E_i = E^* - k_q Q^+ + \delta E + \delta Q \quad (18)$$

3.3 二次控制系统分析

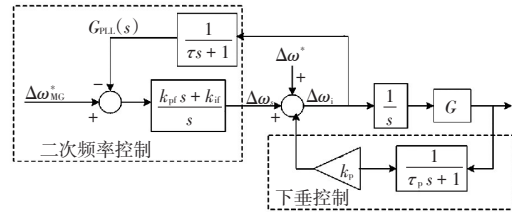
由于增加了控制器,会使控制系统的稳定性造成影响,所以通过线性化式(3)和式(18),采用小信号模型来进行系统的动态性能分析,则表示为

$$\begin{cases} \Delta P_i(s) = G\Delta\varphi_i(s) \\ \Delta Q_i(s) = H\Delta E_i(s) + F\Delta V(s) \end{cases} \quad (19)$$

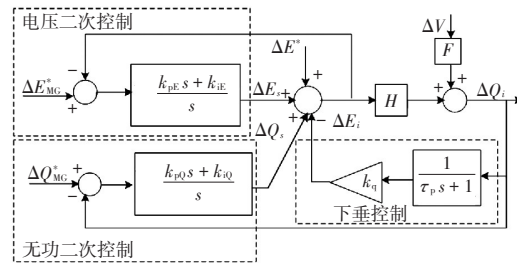
$$\begin{cases} \Delta\omega_i(s) = \Delta\omega^*(s) - k_p \Delta P_i(s) + \Delta\omega_s(s) \\ \Delta E_i(s) = \Delta E^*(s) - k_q \Delta Q_i(s) + \Delta E_s(s) + \\ \Delta Q_s(s) \end{cases} \quad (20)$$

其中: $G = \frac{E_{ie} V_e \cos \varphi_{ie}}{X_i}$, $H = \frac{2E_{ie} - V_e \cos \varphi_{ie}}{X_i}$, $F = -\frac{E_{ie} \cos \varphi_{ie}}{X_i}$, $\Delta\varphi_i = \int \Delta\omega_i dt$ 。式中: E_{ie} 为动态系统的母线电压; V_e 为动态系统的逆变器输出电压; φ_{ie} 为动态系统的逆变器输出电压与母线电压相位; X_i 为动态系统的线路感抗。

图7为电压、频率及无功功率的小信号模型。框图包括下垂控制、分布式二次控制,其中LPF为低通滤波器,其切断频率为0.5 Hz, G_{LPF} 为低通滤波传递函数; G_{PLL} 为锁相环传递函数,用来提取相位, τ 为二次控制时间常数, τ_p 为下垂控制时间常数。



(a) 频率控制模型



(b) 电压及无功控制模型

图 7 小信号表示的电压、频率及无功功率

Fig.7 Voltage, frequency, and reactive power represented by small signals

系统的动态性能,可用状态空间方程表示为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \quad (21)$$

频率控制模型如图7(a)所示,式中: $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别为输出低通滤波器、锁相环、PI控制器、积分项角; A 为系数矩阵,有

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_p} & 0 & 0 & G \\ -\frac{k_p}{\tau_p} & -\frac{1+k_{pf}}{\tau} & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{k_{if}}{\tau} & 0 & 0 \\ -\frac{k_p}{\tau_p} & -\frac{k_{pf}}{\tau} & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

电压控制模型如图7(b)所示, $x = [x_1 \ x_2]^T$, 状态变量 x_1, x_2 代表低通滤波器、PI 控制器, 其中 A 表示为

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1 + k_{pE} + k_q H}{\tau_p(1 + k_{pE})} & \frac{H}{1 + k_{pE}} \\ \frac{k_q k_i E}{\tau_p(1 + k_{pE})} & -\frac{k_i E}{1 + k_{pE}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: $E_{ie} = 1; V_e = 1; \varphi_{ie} = 1; X_i = 0.001; k_i$ 为积分系数。结合表1和表2的参数可以得到 G, H, F , 并通过状态矩阵 A 来分析系统的稳定性。

图8显示了电压频率的零极点图, 图中可以看出, 零极点在左平面, 则系统在稳定范围内, 证明该控制方法的提出不会影响系统的稳定性。

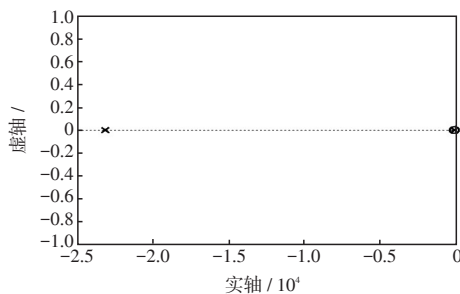


图8 电压、频率零极点图

Fig.8 Zero-pole diagram of voltage and frequency

4 仿真及实验分析

为验证以上控制方法的适用性, 本文基于 Matlab/Simulink 软件, 搭建含有2个分布式电源的仿真实验平台, 如图9所示。主电路和控制系统的仿真参数如表1和表2所示。

图10为二次控制参数的波形, 图10(a)、(b)中一次控制的输出电压、频率由于受到有功、无功功率的影响, 电压幅值和频率存在偏差, 0.5 s时经过

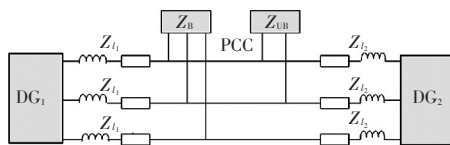


图9 测试系统仿真结构

Fig.9 Simulation structure of test system

表1 主电路参数

Tab.1 Parameters of main circuit

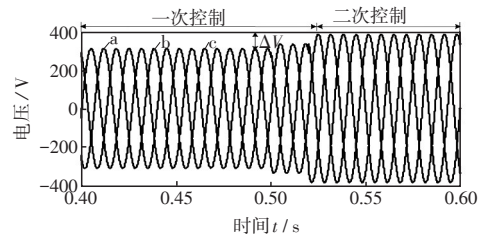
参数	数值	参数	数值
U_d / V	650	Z_{l1}	$0.6 + j1.50$
L / mH	1.8	Z_{l2}	$0.3 + j0.50$
$C / \mu\text{F}$	25		

表2 控制系统参数

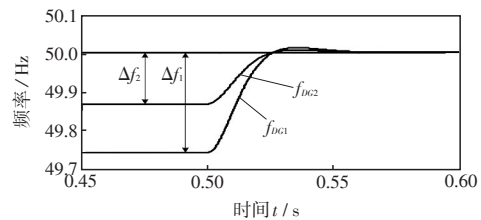
Tab.2 Parameters of control system

参数	数值	参数	数值
τ / s	0.05	k_{pV}	2
k_i	0.02	k_{pI}	10
R_v / Ω	1	k_{vV}	80
L_v / mH	4	k_{cI}	800
ω_{cV}	2	k_p	0.002
ω_{cI}	2	k_q	0.013
k_{pI}	0.02	k_{pE}	0.03
k_{iI}	4	k_{iE}	0.6
k_{pQ}	0.000 2	k_{iQ}	0.2

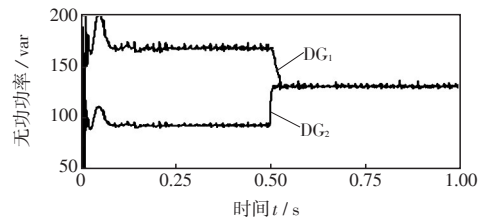
二次控制器的调节控制, 电压幅值达到了其参考值; 频率的偏差同样经过二次控制器的调节得到了修正, 使得频率达到了其参考值 f_{MG}^* 。图10(c)在0.5 s补偿前DG的无功功率根据系统容量的设置按2:1进行分配, 0.5 s加入二次控制, 由于二次无功功率的控制调节, 补偿后无功功率实现了平均分配。图10中电压幅值、频率和无功功率得偏差得到了很好的修正, 证明了加入二次控制的必要性。



(a) 电压



(b) 频率



(c) 无功功率

图10 微电网电压、频率和无功功率输出波形

Fig.10 Waveforms of voltage, frequency, and reactive power of microgrid

图11为微电网的DG输出有功功率波形, 从图中可以看出, 在0.5 s之前(补偿前), DG的有功功率(曲线重合)根据自己的容量按1:1进行分配, 0.5 s加入二次控制, 有功功率功率增加, 但依然按1:1

比例分配。

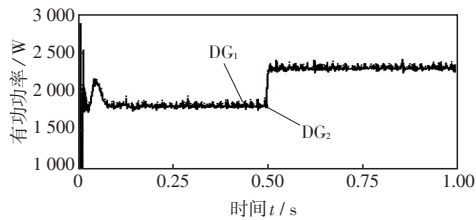


图 11 补偿前后有功功率波形
Fig.11 Waveforms of active power before and after compensation

5 结 语

本文针对微电网PCC点的电压质量问题,通过研究分析,提出电压质量二次控制方法。该方法基于 $\alpha\beta$ 坐标系,采用分层控制策略,其中一次控制作为底层控制,对微电网的稳定运行起到关键的作用;二次控制对微电网电压幅值、频率及无功功率偏差进行了修正,并对不平衡电压进行了有效的补偿,微网输出有功功率也得到了精确的分配,最后通过仿真验证了本文所提控制策略的正确性。

参考文献:

- [1] Olivares D E, Mehrizi-Sani Ali, Etemadi A H, *et al.* Trends in microgrid control[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2014, 5(4): 1905-1919.
- [2] Wu Lizhen, Yang Xusheng, Hao Xiaohong, *et al.* Networked hierarchical control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded microgrid with multiple inverters[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2015, 11(6): 2089-2102.
- [3] 符杨, 黄丽莎, 赵晶晶 (Fu Yang, Huang Lisha, Zhao Jingjing). 基于风储协调控制的微电网平滑切换控制策略 (Microgrid control strategy for smooth mode transfer based on coordination between double-fed induction generator and battery)[J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA), 2017, 29(3): 55-61.
- [4] 施永 (Shi Yong). 微网系统逆变及组网关键技术研究 (Control Strategies of Microgrid Inverters and Microgrid System)[D]. 合肥: 合肥工业大学电气与自动化工程学院 (Hefei: School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology), 2015.
- [5] De B K, Bolsens B, Van d K J, *et al.* A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [6] Hojo M, Iwase Y, Funabashi T, *et al.* A method of three-phase balancing in microgrid by photovoltaic generation systems[C]//13 th International Power Electronics Motion Control Conference. Poznan, Poland, 2008: 2487-2491.
- [7] 邓翔天, 袁荣湘, 肖振锋, 等 (Deng Xiangtian, Yuan Rongxiang, Xiao Zhenfeng, *et al.*). 基于瞬态功率理论的输电线路分相电流差动保护 (Real-time risk assessment on equipment failure outage of distribution network) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2014, 34(11): 82-88, 94.
- [8] 谢玲玲, 时斌, 华国玉, 等 (Xie Lingling, Shi Bin, Hua Guoyu, *et al.*). 基于改进下垂控制的分布式电源并联运行技术 (Parallel operation technology of distributed generations based on improved droop control)[J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37(4): 992-998.
- [9] 董晨露, 杨盼盼, 王洋 (Dong Chenlu, Yang Panpan, Wang Yang). 改进的低压微电网孤岛模式下的控制策略 (Improved control strategy of low-voltage micro-grid under island mode)[J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2015, 52(11): 69-73.
- [10] Liu Quanwei, Tao Yong, Liu Xunhao, *et al.* Voltage unbalance and harmonics compensation for islanded microgrid inverters[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(5): 1055-1063.
- [11] Savaghebi M, Jalilian A, Vasquez J C, *et al.* Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1390-1402.
- [12] 吴丽珍, 杨旭生, 郝晓红, 等 (Wu Lizhen, Yang Xusheng, Hao Xiaohong, *et al.*). 基于二次控制的微电网电压不平衡补偿策略 (Voltage unbalance compensation strategy based on secondary control for microgrid)[J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2017, 51(5): 42-45.
- [13] 曲利民 (Qu Limin). 微电网动态相量模型与协同控制策略研究 (Research on Dynamic Phasor Model and Cooperative Control Strategy of Microgrid)[D]. 兰州: 兰州理工大学电气工程与信息工程学院 (Lanzhou: College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology), 2016.

作者简介:

杨旭生 (1985—), 男, 硕士, 助教, 研究方向为新能源发电与智能电网。Email: 624489051@qq.com

陈伟 (1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量分析和控制、新能源发电技术。Email: chenlin@lut.cn

吴丽珍 (1973—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为分布式发电与微电网的运行与控制。Email: wulzh@lut.cn