

微网系统不平衡电压补偿控制策略

施永^{1,2}, 杨向真^{1,2}, 苏建徽^{1,2}, 赖纪东^{1,2}, 茆美琴^{1,2}

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽省合肥市 230009;

2. 合肥工业大学教育部光伏系统工程研究中心, 安徽省合肥市 230009)

摘要: 微网系统中负荷不平衡会造成系统中电压的不平衡, 影响微网系统的供电质量。针对这一问题, 文中首先介绍了微网系统逆变器的控制方法, 然后基于下垂控制, 分析了微网系统电压不平衡的原因。为保证微网逆变器端口和公共耦合点电压能同时满足供电质量标准的要求, 提出一种采用微网中储能逆变器对逆变器端口和微网公共耦合点不平衡电压进行同时补偿的控制策略, 对所提补偿策略进行了详细的阐述, 最后通过仿真和实验分析验证了所提方法的有效性。

关键词: 微网(微电网); 电压不平衡; 下垂控制; 电压补偿控制; 储能逆变器

0 引言

低压微网中的负载主要以单相为主, 不平衡负载的接入会产生三相不平衡电流, 造成微网系统中逆变器端口和公共耦合点(PCC)电压的不平衡跌落, 影响微网中逆变器的控制, 损坏家用电器寿命, 影响系统的继电保护等^[1-4]。对此, IEEE 的标准规定, 电力系统三相供电不平衡度要小于 2%^[5], 中国国标也规定配电网供电电压不平衡度要小于 2%, 短时不可以超过 4%^[6]。为了让微网在带不对称负载时还能够确保高供电质量, 需要对不平衡电压进行补偿。目前, 配电网中常采用有源电力滤波器来实现不平衡电压补偿^[7-10], 但是在实际的微网系统中, 负荷可能会分散地连接在不同的节点, 因此有源电力滤波器的容量以及安装位置的选取是个难题, 另外此方法也势必会增加微网系统的建造成本。因此, 通过对微网中现有的逆变器进行控制, 来实现不平衡电压补偿, 在降低系统建造成本的同时, 可有效提高补偿的灵活性, 目前国内外有多位学者对此进行了研究。文献[11-12]采用与有源电力滤波器补偿类似的方法, 通过在不平衡负荷附近安装专用的微网不平衡电压补偿器, 针对性地进行补偿, 但该方法也需要额外的补偿装置。文献[13]以消除负序无功功率为控制目标, 通过调节电压参考值, 实现对逆变器端口的不平衡电压进行补偿, 采用类似方法的还有文献[14-15]; 文献[16]采用模型预测控制来改

善负载不平衡情况下逆变器输出功率的过载问题以及电压不平衡问题; 文献[17]采用负序输出阻抗控制法来补偿负序电流造成的压降。上述方法可以有效地减小逆变器端口的电压不平衡度, 但是均未考虑对 PCC 不平衡电压进行补偿。微网系统中, 多数负载是连接在 PCC 上的, 因此对 PCC 的不平衡电压进行补偿也是提高微网供电质量的关键。针对 PCC 的不平衡电压补偿, 有学者提出基于微网系统二次调整的补偿方法, 根据 PCC 的电压不平衡度计算出补偿系数, 下发给逆变器进行负序电压控制, 以实现 PCC 不平衡电压的补偿^[18-20], 此方法能够有效地对 PCC 不平衡电压进行补偿, 但是却忽略了逆变器端口电压的不平衡问题。

目前, 文献中所提的补偿方法都具有很好的效果, 但是均为单独对逆变器端口或者 PCC 不平衡电压进行补偿, 无法实现兼顾。本文在上述学者研究的基础上, 给出一种兼顾逆变器端口和 PCC 电压不平衡度的补偿方法, 参与不平衡电压补偿控制的各台逆变器优先补偿本机的端口电压, 在本机端口电压不平衡度达到供电标准要求, 并且有剩余补偿能力的情况下, 再根据本机端口电压的不平衡度和微网中央控制器(MGCC)下发的 PCC 电压不平衡度, 综合计算出新的负序电压参考值, 控制逆变器端口负序电压, 实现同时对逆变器端口和 PCC 电压进行补偿。

1 微网系统分层控制结构

分层控制是微网常用的控制结构, 通常包含 3 层: 微源控制层、微网控制层和能量管理层^[21-24]。

收稿日期: 2017-06-17; 修回日期: 2017-07-17。

上网日期: 2017-08-29。

国家自然科学基金资助项目(51577047)。

本文所研究的不平衡电压补偿控制算法涉及其中的微源控制层和微网控制层,本文所用的微网系统拓扑结构见附录 A 图 A1。该微网系统由储能逆变器、MGCC、智能断路器和三相不平衡负载等主要设备组成。储能逆变器采用下垂控制来建立系统内的电压频率;MGCC 具有微网系统数据采集处理、运行状态监控以及微网系统的二次调频调压、系统预同步控制等功能。智能断路器安装在微网和大电网之间的 PCC 处,能够对微网和大电网的电压、电流进行采样,计算微网和大电网的频率、相位、功率以及电压不平衡度。

2 微网逆变器控制

微网中包含光伏、风电、储能等多种微源,本文使用微网中的储能逆变器进行不平衡电压补偿,本节首先针对储能逆变器的结构和控制策略进行简要介绍。系统中的储能逆变器为三相半桥结构,交流侧连接三角形/星形升压隔离变压器,输出侧滤波器采用 LC 滤波器结构。逆变器的控制采用下垂控制,以实现多机并联支撑微网系统电压频率,内环采用 dq 坐标下解耦控制的电压电流双环结构,控制框图如附录 A 图 A2 所示,图中逆变器的瞬时功率计算如式(1)所示,有功功率和无功功率均在 dq 坐标系下进行计算,并通过一阶低通滤波器滤波后反馈到下垂环节。

$$\begin{cases} P_{\text{LPF}} = 1.5 \frac{\omega_p}{s + \omega_p} (v_{od}^+ i_{od}^+ + v_{oq}^+ i_{oq}^+) \\ Q_{\text{LPF}} = 1.5 \frac{\omega_p}{s + \omega_p} (v_{od}^+ i_{oq}^+ - v_{oq}^+ i_{od}^+) \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_{od}^+ , v_{oq}^+ 和 i_{od}^+ , i_{oq}^+ 分别为输出电压和电流的 dq 轴分量; ω_p 为一阶低通滤波器的截止频率。

本文所用储能逆变器在微网并网离网情况下统一采用下垂控制。在微网离网运行模式下,储能逆变器按照下垂控制实现对系统内负荷的按比例分配,同时实现对微网系统交流母线电压频率进行支撑;在并网运行模式下,储能逆变器要实现并网有功功率和无功功率的无差控制,所以在并网运行时,逆变器无功下垂环节增加了积分控制,以兼顾微网不同运行模式对储能逆变器控制的不同要求。附录 A 图 A3 给出了本文所用下垂控制的详细结构,图中下垂控制表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 + m(P_0 - P_{\text{LPF}}) \\ E = E_0 + \left(n + \frac{S_M K_{\text{QI}}}{s} \right) (Q_0 - Q_{\text{LPF}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_0 和 Q_0 分别为下垂控制有功功率和无功功率的参考值,其值可以通过逆变器的人机交互系统

设置,也可以根据 MGCC 中二次调频、预同步和能量管理等算法的计算结果,通过通信系统下发给各台逆变器,离网运行时一般将其设置为 0; ω_0 为逆变器下垂控制的频率参考值; E_0 为电压参考值,一般按照供电电能质量标准中的规定设置; ω 和 E 分别为逆变器的运行频率和内电势; S_M 为用于控制无功下垂环节中积分项投切的微网运行模式标志位; m 和 n 分别为有功频率下垂系数和无功电压下垂系数^[23-24]。

根据下垂环节输出的内电势 E 和频率 ω 可计算电压内环的参考值。首先,对频率 ω 进行积分可计算出输出电压的相位参考值;由于采用电压矢量定向,因此电压内环 q 轴参考值为 0, d 轴参考值就等于内电势 E 。内环参考电压生成表达式如式(3)所示。

$$\begin{cases} \theta = \int \omega dt \\ V_{\text{droop},d} = E \\ V_{\text{droop},q} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

3 微网系统不平衡电压补偿控制策略

3.1 微网电压不平衡机理分析

为进行不平衡电压的补偿,首先要分析不平衡电压的产生原因,本文以两台逆变器并联带不平衡负荷的结构为例,来阐述不平衡电压产生机理。根据对称分量法,可把三相不平衡电压和电流分解成正序、负序和零序分量的叠加,因此三相电路也可以根据线性电路叠加定理,分解为正、负、零序 3 个电路的叠加^[14-15]。本文所用储能逆变器输出侧使用了三角形/星形变压器进行了隔离,逆变器和 PCC 之间无零序电流,因此本文只需对正序和负序两个等值电路进行分析。图 1 是本文分析使用的两台逆变器并联带载的正负序等值电路结构。

根据图 1(b)的负序等值电路计算得到的逆变器端口以及 PCC 的负序电压的表达式为:

$$\begin{cases} v_1^- = -Z_{o1} i_{o1}^- \\ v_2^- = -Z_{o2} i_{o2}^- \\ v_{\text{PCC}}^- = v_1^- - Z_{L1} i_{o1}^- = v_2^- - Z_{L2} i_{o2}^- \end{cases} \quad (4)$$

在逆变器中没有使用不平衡电压控制时,其内电势完全控制为正序,此时逆变器的负序输出阻抗和流过逆变器端口的负序电流决定了逆变器端口的负序电压。利用逆变器端口电压减去线路压降,即可计算出 PCC 负序电压。分析式(4)的负序电压表达式可以得出以下结论:负序输出阻抗(包含线路阻抗)以及负序电流是形成不平衡电压的因素。因此,消除上述两个因素中的任何一个,都可以解决逆变

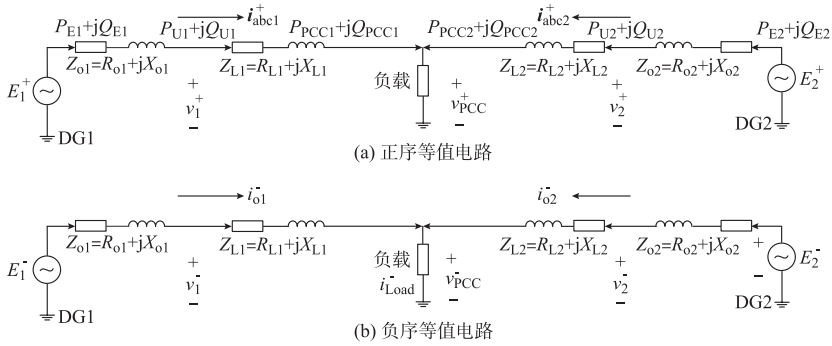


图 1 两台逆变器并联带载正负序等值电路

Fig.1 Positive and negative sequence equivalent circuits of two parallel inverters with loads

器端口和 PCC 的电压不平衡问题。但是只要系统有不平衡负载,就会产生负序电流,虽然可以通过控制使其中一台逆变器输出负序电流为零,但是系统中其他逆变器就需要负担更多的负序负载电流,承担负序电流多的逆变器的端口电压质量就会变差,而且也不能解决 PCC 的电压不平衡问题;输出阻抗中的线路阻抗部分是由硬件决定的,虽然也有学者提出采用虚拟负序负阻抗的控制方法,对负序线路阻抗进行抵消,但这种控制方法需要精确测量出线路阻抗值,工程上实现困难^[25]。综上所述,无法采用消除造成电压不平衡的这两个直接因素入手来解决电压不平衡问题。但是如果针对性地控制逆变器内电势,产生负序电压来补偿输出阻抗和线路阻抗上的负序压降,同样可以实现对逆变器端口以及 PCC 的不平衡电压进行补偿,如式(5)所示。

$$\begin{cases} v_1^- = E_1^- - Z_{o1} i_{o1}^- \\ v_2^- = E_2^- - Z_{o2} i_{o2}^- \\ v_{PCC}^- = v_1^- - Z_{L1} i_{o1}^- = v_2^- - Z_{L2} i_{o2}^- \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)可以看出:只要将逆变器内电势负序电压控制为 $E_1^- = Z_{o1} i_{o1}^-$,即可将逆变器端口电压补偿到平衡。在只对逆变器端口不平衡电压进行补偿时,PCC 电压的不平衡问题也会得到一定程度的改善,此时 PCC 负序电压完全由线路阻抗 Z_{L1} 和流过线路的负序电流决定,无法保障 PCC 的电压质量。如果将补偿负序内电势控制为 $E_1^- = Z_{o1} i_{o1}^- + Z_{L1} i_{o1}^-$,就可以实现将 PCC 电压补偿到平衡,但是这种方式会造成对逆变器端口电压的过补偿,可能造成逆变器端口电压的不平衡度超出供电标准规定的范围。综上所述,本文给出一种综合补偿控制策略,同时考虑逆变器端口和 PCC 电压不平衡度来计算补偿电压参考值,利用系统内的储能逆变器负序电压控制来实现对逆变器端口和 PCC 不平衡电压进行综合补偿。

3.2 微网电压不平衡补偿控制

如果将逆变器端口负序电压参考值设置为零,则逆变器端口电压补偿项的表达式为:

$$\begin{cases} v_{cd}^- = -v_d^- \left(K_{ucp} + \frac{K_{ucI}}{s} \right) \\ v_{cq}^- = -v_q^- \left(K_{ucp} + \frac{K_{ucI}}{s} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: v_d^- 和 v_q^- 分别为逆变器端口负序电压的 d 轴和 q 轴分量; K_{ucp} 和 K_{ucI} 分别为负序电压比例-积分(PI)调节器的比例系数和积分系数。

在逆变器的输出参考电压上叠加式(6)计算出的补偿项 v_{cd}^- 和 v_{cq}^- ,即可对逆变器端口负序电压实现完全补偿。

为对 PCC 电压进行补偿,需要将 PCC 电压不平衡度引入,再根据逆变器端口和 PCC 电压的不平衡度,计算出可兼顾到逆变器端口和 PCC 不平衡补偿的新负序电压参考值。其中 PCC 电压的不平衡度可以由图 3 中 PCC 处的智能断路器计算出,利用系统内的通信系统发送给 MGCC,由 MGCC 分配发送给参与补偿控制的储能逆变器。根据国标中的规定,电压不平衡度的定义如式(7)所示^[6]。

$$\epsilon = \frac{\sqrt{v_d^{-2} + v_q^{-2}}}{\sqrt{v_d^{+2} + v_q^{+2}}} \times 100\% \quad (7)$$

逆变器端口电压的不平衡度和 PCC 电压的不平衡度为: $\epsilon_i = (\sqrt{v_{id}^{-2} + v_{iq}^{-2}} / \sqrt{v_{id}^{+2} + v_{iq}^{+2}}) \times 100\%$,

$$\epsilon_{PCC} = (\sqrt{v_{PCCd}^{-2} + v_{PCCq}^{-2}} / \sqrt{v_{PCCd}^{+2} + v_{PCCq}^{+2}}) \times 100\%。$$

在进行不平衡电压补偿时,对 PCC 进行补偿的前提是保证逆变器端口电压不平衡度在电网供电标准的允许范围内,所以首先要为逆变器端口电压的不平衡度设置一个限幅,首先将逆变器端口电压不平衡度补偿到设置的限幅以内,才能允许对 PCC 电压进行补偿。本文设置逆变器端口电压的不平衡度范围为 $\epsilon_i \leq 1.5\%$ 。启动逆变器端口和 PCC 不平衡电压综合补偿控制后,根据逆变器端口电压不平衡度来计算本台逆变器对 PCC 电压进行补偿的不平衡度参考值系数 K_{VUF} ,参考值系数计算表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} K_{VUF} = \frac{1}{\epsilon_{i,max}} \epsilon_i & \epsilon_i \leq \epsilon_{i,max} \\ K_{VUF} = 1 & \epsilon_i > \epsilon_{i,max} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\epsilon_{i,max}$ 为逆变器端口电压不平衡度限幅。

式(8)所示 PCC 电压不平衡度参考值系数与逆变器端口电压不平衡度的关系可用图 2 简要描述。

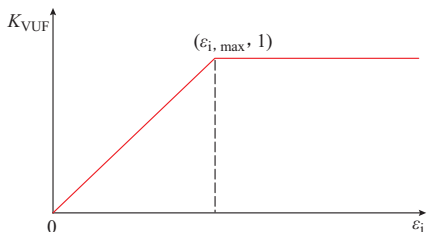


图 2 PCC 电压不平衡度参考值系数与逆变器端口电压不平衡度的关系曲线

Fig.2 Relationship between reference coefficient of PCC voltage unbalance factor and inverter output voltage unbalance factor

PCC 不平衡度参考值 $\epsilon_{PCC,ref}$ 可按下式计算：

$$\epsilon_{PCC,ref} = K_{VUF} \epsilon_{PCC} \quad (9)$$

逆变器对 PCC 电压补偿控制的算法嵌入在每一台参与补偿的逆变器控制器内。完整的控制框图如图 3 所示,其中详细展示了第 1 台逆变器的补偿控制结构框图,图中 S_{CE} 为 PCC 电压补偿使能位,如果 $S_{CE} = 0$,则逆变器只补偿本机端口电压,如果 $S_{CE} = 1$,则启动对逆变器端口和 PCC 电压综合补偿的控制, S_{CE} 可以通过 MGCC 或者逆变器自身监控系统设置。综合式(6)、式(8)和式(9),得到 PCC 电压补偿控制函数如式(10)所示。

$$\begin{cases} K_{UCR} = \left(K_{uPCCP} + \frac{K_{uPCCI}}{s} \right) (\epsilon_{PCC,ref} - \epsilon_{PCC}) \\ v_{UCPCCI,d}^- = K_{UCR} i_d^- \\ v_{UCPCCI,q}^- = K_{UCR} i_q^- \end{cases} \quad (10)$$

式中： K_{uPCCP} 和 K_{uPCCI} 分别为 PCC 补偿调节器的比例系数和积分系数； K_{UCR} 为调节器输出的 PCC 不平衡电压补偿系数,补偿系数与逆变器输出负序电流的 dq 轴分量相乘得到补偿电压 $v_{UCPCCI,d}^-$ 和 $v_{UCPCCI,q}^-$,将其叠加在逆变器电压内环的参考值上,就可以对 PCC 不平衡电压进行补偿控制。

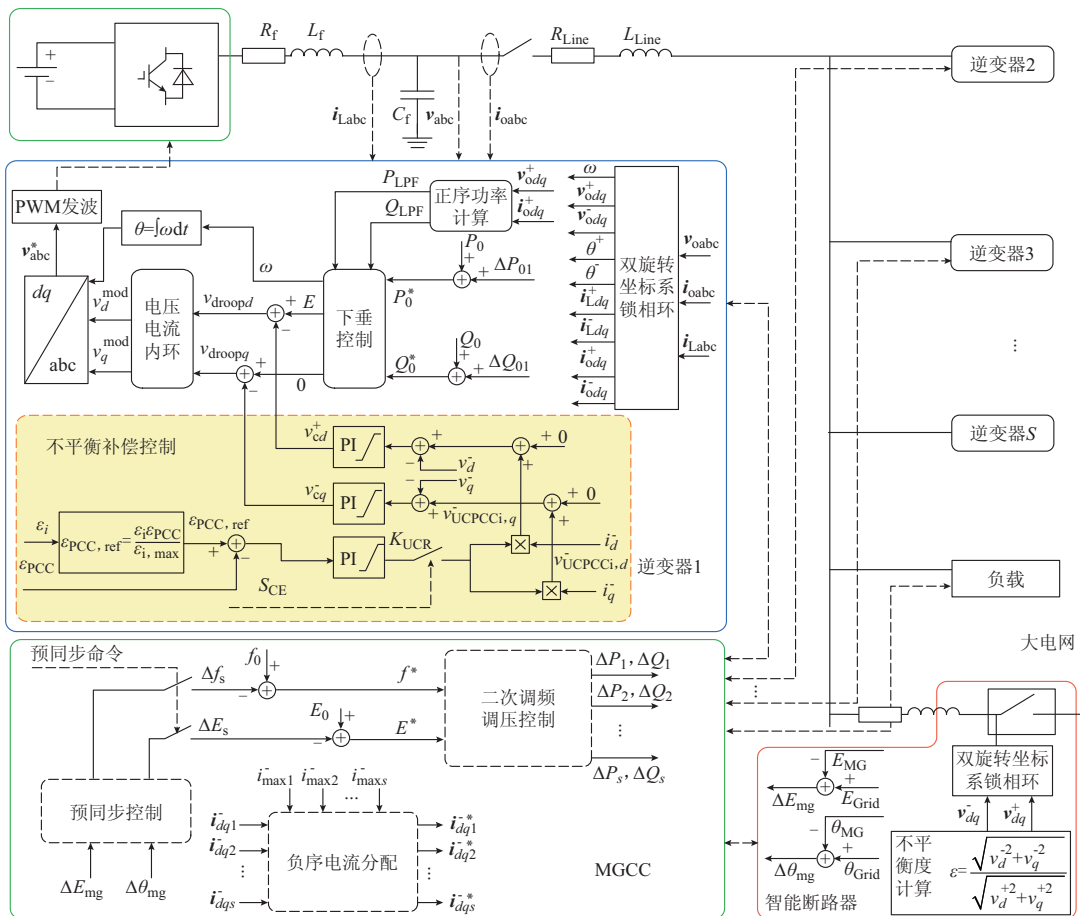


图 3 不平衡电压补偿控制框图

Fig.3 Block diagram of unbalance voltage compensation control

从图3可以看出,微网智能断路器采样PCC电压,计算出PCC电压不平衡度,并通过以太网通信将计算出的PCC电压不平衡度发送给MGCC,再由MGCC下发给系统中参与补偿控制的各台储能逆变器,由逆变器根据自身端口电压不平衡度和PCC电压不平衡度计算出电压参考值,控制其输出电压,实现对逆变器端口和PCC电压的综合补偿。

4 仿真与实验分析

为验证本文所提的补偿算法,在MATLAB/Simulink环境下搭建仿真模型进行了仿真分析,并在项目组搭建的微网实验平台上进行了实验验证。仿真平台和实验平台所用储能逆变器参数相同,逆变器按照额定容量100 kVA设计,直流电压600 V,三角形/星形升压变压器隔离输出,额定输出电压为380 V/50 Hz,输出滤波器采用LC滤波器,滤波电感 $L_f=0.35$ mH,滤波电容 $C_f=100$ μ F,电流内环PI调节器的比例系数和积分系数分别取 $K_{cp}=2.2$ 和 $K_{ci}=1500$,电压环的调节器比例系数和积分系数分别取 $K_{vp}=0.3$ 和 $K_{vi}=400$,逆变器DG1和DG2的线路电感均设为0.016 mH,电阻均设为0.024 Ω ,虚拟阻抗分别设置为0.1 mH和0.22 mH,逆变器DG1的有功下垂系数和无功下垂系数分别设置为0.000125和0.00125,逆变器DG2的有功下垂系数和无功下垂系数分别设置为0.00025和0.0025。仿真说明及仿真结果分析见附录B。

实验平台按照图3所示结构连接,实验平台图片见附录C图C1。本文实验使用了两台储能逆变器、一套MGCC、一台智能断路器和一组三相不平衡负载。两台逆变器经过模拟线路阻抗并联于PCC,PCC处A相和B相接30 kW不平衡负载。系统中MGCC与储能逆变器之间通过以太网通信,通信周期为20 ms。逆变器控制器采用TI公司的TMS320F28335,载波频率为6 kHz。实验过程中,使用横河示波器记录逆变器端口及PCC的电压波形,两台逆变器的电压不平衡度由逆变器控制器计算,PCC电压不平衡度由智能断路器计算,并通过通信发送给MGCC,由MGCC记录并存储于数据库中,根据记录数据,离线绘制电压不平衡度曲线。

下面结合实验结果对传统的逆变器端口不平衡电压补偿控制和本文所提的逆变器端口及PCC不平衡电压综合补偿控制进行实验对比分析。补偿前后的逆变器端口和PCC电压波形见附录C图C2,图4和图5是实验过程中的逆变器端口及PCC电

压不平衡度曲线。实验过程中,首先不加任何不平衡电压补偿控制算法,由两台逆变器并联带30 kW不平衡负载,两台逆变器端口及PCC电压的不平衡度如图4中启动逆变器端口电压补偿控制前曲线所示,逆变器DG1和DG2的端口电压不平衡度分别为0.076和0.078,PCC电压不平衡度达到0.12。在启动逆变器端口电压不平衡度补偿控制以后,两台逆变器端口的电压不平衡度下降到接近于0,同时PCC电压的不平衡度下降到0.021,但依然超过供电质量标准规定的不平衡度范围。图5中,在启动了文中所提的逆变器端口和PCC电压综合补偿控制算法以后,两台逆变器端口的电压不平衡度上升,PCC电压不平衡度下降,经过一段调整时间后,最终稳定在0.011,逆变器端口和PCC电压的不平衡度均能达到小于0.02的供电标准要求。

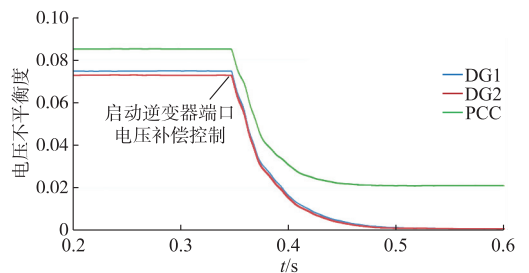


图4 逆变器端口电压补偿控制时的电压不平衡度
Fig.4 Voltage unbalance factor with the inverter output voltage compensation control

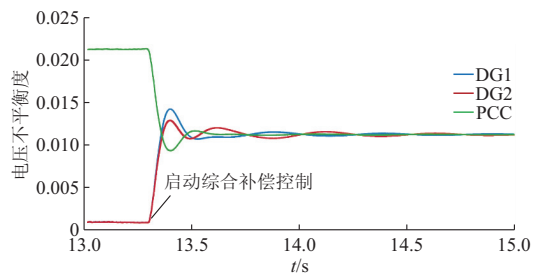


图5 逆变器端口和PCC电压综合补偿控制的电压不平衡度
Fig.5 Voltage unbalance factor with the comprehensive compensation control of inverter output and PCC voltages

从上述实验结果可以看出,只对逆变器端口电压进行补偿的方法能够有效地降低逆变器端口电压不平衡度,但是无法同时兼顾逆变器端口和PCC电压的不平衡补偿问题。本文给出的兼顾逆变器端口电压和PCC电压不平衡度的综合补偿方法,能够优先对逆变器本机的端口电压进行补偿,在确保逆变器端口电压不平衡度满足供电标准要求的条件下,根据逆变器自身的补偿能力对PCC不平衡电压进行补偿。此外,由于外接专用补偿装置的接入与不

平衡负载减轻有同样的效果,因此本文补偿算法与采用专用的不平衡电压补偿装置不会产生冲突,专用不平衡电压补偿装置的接入可以减小逆变器补偿的压力,相互配合能达到更好的补偿效果。

5 结语

针对微网中三相不平衡负载引起的逆变器端口电压不平衡和 PCC 电压不平衡的问题,提出了一种优先补偿逆变器端口不平衡电压,在逆变器端口电压不平衡度满足供电质量要求的基础上,再对 PCC 不平衡电压进行补偿的不平衡电压综合补偿控制策略。通过逆变器端口补偿控制与文中所提综合补偿控制的对比仿真和实验分析,说明相比于逆变器端口补偿控制方法,本文所提的补偿控制算法能够在逆变器补偿能力足够的情况下,实现同时将逆变器端口和 PCC 电压补偿到供电标准要求的电压不平衡度范围内。

本文只考虑了对单个 PCC 进行不平衡补偿的控制,规模较大的微网中含有多条交流母线和多个 PCC,在多个 PCC 都存在电压不平衡的情况下,如何对系统内参与补偿的逆变器进行分配调度,实现对系统中多个 PCC 同时进行补偿,是课题组需要进一步深入研究的方向。

本文在完成的过程中,受到台达基金电力电子科教发展计划重大项目(DREM2015002)和合肥工业大学博士专项科研资助基金(JZ2015HGBZ0487)的资助,在此表示衷心感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] STUYTS J, DRIESEN J, BREUCKER S D. Comparing an unbalance compensating converter with and without a neutral connection[C]// IEEE International Energy Conference, April 4-8, 2016, Leuven, Belgium; 6p.
- [2] KAWABATA Y, MAEKAWA T, KAWABATA T. Novel PLL systems which suffer little influence from voltage unbalance and distortion[J]. Journal of the Japan Institute of Power Electronics, 2010, 35: 354-359.
- [3] MEERSMAN B, RENDERS B, DEGROOTE L, et al. The influence of grid-connected three-phase inverters on voltage unbalance [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, USA; 9p.
- [4] HAMZEH M, EMAMIAN S, KARIMI H. Robust control of an islanded microgrid under unbalanced and nonlinear load conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(2): 512-520.
- [5] IEEE recommended practice for monitoring electric power quality; IEEE Std 1159—2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995)[S]. 2009.
- [6] 中华人民共和国国家标准.电能质量-三相电压不平衡[S].2008.
- [7] XU Y, TOLBERT L M, KUECK J D, et al. Voltage and current unbalance compensation using a static var compensator [J]. IET Power Electronics, 2010, 3(6): 977-988.
- [8] GARCIA CAMPANHOL L B, OLIVEIRA D S S A, GOEDTEL A. Application of shunt active power filter for harmonic reduction and reactive power compensation in three-phase four-wire systems[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(11): 2825-2836.
- [9] XU Y, KUECK J D, TOLBERT L M, et al. Voltage and current unbalance compensation using a parallel active filter [C]// 38th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC), June 17-21, 2007, Orlando, USA: 2919-2925.
- [10] 董亮,李文可,温传新,等.链式 STATCOM 负序电流补偿能力分析[J].电力系统自动化,2015,39(23):132-138. DOI: 10.7500/AEPS20150624009.
DONG Liang, LI Wenke, WEN Chuanxin, et al. Analysis of negative sequence current compensation ability of STATCOM with cascade topologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 132-138. DOI: 10.7500/AEPS20150624009.
- [11] OE S P, CHRISTOPHER E, SUMNER M, et al. Microgrid unbalance compensator—mitigating the negative effects of unbalanced microgrid operation[C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, October 6-9, 2013, Lyngby, Denmark; 5p.
- [12] ZHOU Xiao, TANG Fen, LOH P C, et al. Four-leg converters with improved common current sharing and selective voltage-quality enhancement for islanded microgrids[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2016, 31(2): 522-531.
- [13] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C. Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1390-1402.
- [14] CHENG P, CHEN C A, LEE T L, et al. A cooperative imbalance compensation method for distributed-generation interface converters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2009, 45(2): 805-815.
- [15] 周洁,罗安,陈燕东,等.低压微电网多逆变器并联下的电压不平衡补偿方法[J].电网技术,2014,38(2):412-418.
ZHOU Jie, LUO An, CHEN Yandong, et al. Voltage unbalance compensation for low-voltage microgrid with multi parallelly connected inverters[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 412-418.
- [16] GOLSORKHI M S, LU D D. A decentralized control method for islanded microgrids under unbalanced conditions[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2016, 31(3): 1112-1121.

- [17] HAMZEH M, KARIMI H, MOKHTARI H. A new control strategy for a multi-bus MV microgrid under unbalanced conditions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(4): 2225-2232.
- [18] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C, et al. Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(2): 797-807.
- [19] SHI Hongtao, ZHUO Fang, YI Hao, et al. Control strategy for microgrid under three-phase unbalance condition [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(1): 94-102.
- [20] 陈萌,肖湘宁.孤岛微电网分布式电压不平衡补偿控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 45-51. DOI: 10.7500/AEPS20161118001.
- CHEN Meng, XIAO Xiangning. Distributed control strategy for voltage unbalance compensation in islanded microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 45-51. DOI: 10.7500/AEPS20161118001.
- [21] 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 Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [22] YU Xunwei, SHE Xu, NI Xijun, et al. System integration and hierarchical power management strategy for a solid-state transformer interfaced microgrid system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2014, 29(8): 4414-4425.
- [23] 杨刚,杨奇逊,张涛,等.基于分层控制的多微网并网/解列运行控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 96-101. DOI: 10.7500/AEPS20150623005.
- YANG Gang, YANG Qixun, ZHANG Tao, et al. A control strategy for multi-microgrid connection/disconnection operation based on hierarchical control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 96-101 DOI: 10.7500/AEPS20150623005.
- [24] 施永.微网系统逆变及组网关键技术研究[D].合肥:合肥工业大学,2015.
- [25] HAMZEH M, KARIMI H, MOKHTARI H, et al. Control of a microgrid with unbalanced loads using virtual negative-sequence impedance loop[C]// 5th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), February 5-6, 2014, Tehran, Iran: 78-83.

施永(1985—),男,博士,讲师,主要研究方向:新能源利用与分布式发电技术。E-mail: shiyongmail@yeah.net

杨向真(1982—),女,通信作者,博士,讲师,主要研究方向:分布式发电技术。E-mail: greenleaf_yxz@163.com

苏建徽(1963—),男,博士,教授,主要研究方向:光伏发电、微网、储能及电力传动技术。E-mail: su_chen@126.com

(编辑 蔡静雯)

Compensation Control Strategy of Unbalanced Voltage for Microgrid

SHI Yong^{1,2}, YANG Xiangzhen^{1,2}, SU Jianhui^{1,2}, LAI Jidong^{1,2}, MAO Meiqing^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Research Center for Photovoltaic System Engineering of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Load unbalance in the microgrid can lead to voltage unbalance, which will reduce the power supply quality of the microgrid. To solve this problem, this paper firstly describes the microgrid inverter control method. Then the reason of voltage unbalance in the microgrid is analyzed based on the droop control. To ensure the voltage quality can meet the power supply standard requirements at the microgrid inverter output port and the point of common coupling, an energy storage inverter based unbalance voltage compensation method is proposed, which can simultaneously compensate the unbalance voltage at the inverter output port and the point of common coupling. The proposed strategy is described in details and its performance is verified by simulation in the MATLAB/Simulink software environment and the experiments on the microgrid experimental platform.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577047).

Key words: microgrid; voltage unbalance; droop control; voltage compensation control; energy storage inverter