

DOI: 10.7500/AEPS20140409001

多逆变型分布式电源协调的微电网谐波控制方法

王 鹤¹, 李国庆¹, 李耀峰², 毕 鹏³

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林省吉林市 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司吉林供电公司, 吉林省吉林市 132012;
3. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川省成都市 610021)

摘要: 逆变型分布式电源能够在输出基波功率的同时对微电网中的谐波进行补偿,但是多个逆变型电源同时独立补偿存在交互影响问题。采用相对增益矩阵方法分析 2 个独立补偿逆变型电源之间的交互影响,并提出了一种多逆变型分布式电源协调控制的微电网谐波控制方法。首先选择微电网中的一个节点作为谐波控制的目标节点,然后将检测到的目标节点谐波电压相量分解,通过补偿量分配实现多逆变型分布式电源的协调控制。仿真实验结果证明提出的方法能够有效地协调多个逆变型电源对微电网中的谐波进行抑制。

关键词: 微电网(微网); 分布式电源; 逆变器; 谐波补偿; 协调控制

0 引言

随着对逆变器控制技术研究的深入,逆变型分布式电源在输出基波功率的同时还可以对检测到的谐波进行补偿^[1-3]。这种方法能够在不增加硬件设备的条件下改善电能质量,实质是通过向电网注入反相的谐波电流来改善电压波形^[3]。微电网中包含大量的逆变型分布式电源,充分利用这些现有的逆变型电源对微电网中的谐波进行抑制具有重要作用。

文献[4]对逆变型分布式电源接入点母线电压和微电网提供的三相电流进行检测,提取其中的谐波和不平衡分量并调整逆变器的输出,使微电网只提供负载所需的基波正序有功电流,改善电能质量。文献[5]提出了一种适合于微电网电能质量定制的多功能并网逆变器参考电流生成算法,通过改变各种谐波和不平衡分量的补偿系数,灵活定制微电网的电能质量,避免出现补偿能力不足的情况,充分发挥逆变型分布式电源的电能质量管理能力。

分布式电源的主要任务是按照负载的需要输出有功和无功功率维持微电网的稳定运行。现有文献主要研究基于单个逆变型分布式电源的电能质量管理方法,但是单个逆变型分布式电源在输出所需基波功率的同时很可能无法满足整个微电网的电能质量管理需求。如果多个逆变型分布式电源同时对微电网的电能质量进行管理,则按照独立补偿设计的

控制方法会使分布式电源之间出现负的交互影响^[6-11]。文献[8]利用相对增益矩阵(RGA)方法分析了一个简单电力系统中静止无功补偿器(SVC)和静止同步补偿器之间的交互影响。文献[9]提出了一种基于多目标进化算法的可控串联补偿器与 SVC 协调设计方法,能够有效抑制这 2 个柔性交流输电装置之间的交互影响。

本文对采用多个逆变型分布式电源同时抑制微电网中谐波时的逆变器控制方法进行研究,提出了一种多逆变型分布式电源协调的微电网谐波控制方法。本文以 2 个逆变型分布式电源同时补偿谐波的情况为例,采用 RGA 方法对简化等效电路进行分析,定量计算多逆变型分布式电源之间的交互影响。在此基础上,本文选择微电网中的一个节点作为电能质量管理的目标节点,然后通过估算目标节点与分布式电源接入点之间的互阻抗参数将目标节点的谐波电压相量进行分解,计算 2 个逆变型分布式电源分配的补偿量,最终实现多逆变型分布式电源之间的协调。仿真实验结果证明了本文提出的协调控制方法能够克服多个逆变型分布式电源之间的交互影响,实现利用多个现有逆变型分布式电源对微电网中的谐波进行控制。

1 多逆变电源独立补偿的交互影响

当微电网中的多个逆变型分布式电源同时独立地进行谐波补偿时,每个逆变电源都是将多输入多输出系统当成单输入单输出系统来控制,此时多个逆变电源之间的交互影响不能忽略。单个逆变电源独立运行时非常好的控制方法在多个逆变电源同时

收稿日期: 2014-04-09; 修回日期: 2014-08-20。

国家自然科学基金资助项目(51377016);吉林省科技发展计划资助项目(20130206038GX)。

运行时效果会明显变差^[12]。

常用的交互影响分析方法主要有模态分析法、RGA 方法和奇异值分析方法等^[13-14]，本文采用 RGA 方法对多逆变型分布式电源进行独立谐波补偿时的交互影响进行分析。

计算 RGA 需要首先求得系统输出和输入之间的稳态传递函数矩阵 $\mathbf{G}(0)$ 。考虑如图 1 所示的谐波等效简化电路。

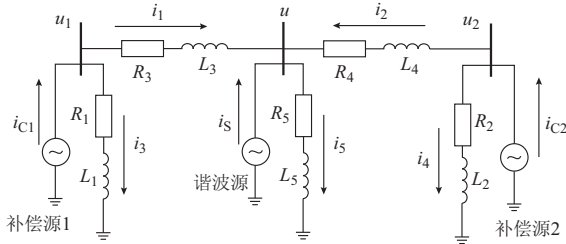


图 1 谐波等效简化电路

Fig.1 Simplified circuit diagram of equivalent harmonic

图 1 中： i_s 为等效谐波源，将 2 个逆变型分布式电源等效成谐波补偿源 i_{c1} 和 i_{c2} ； R_3 和 L_3 ， R_4 和 L_4 为等效线路谐波阻抗； R_1 和 L_1 ， R_2 和 L_2 为补偿源处等效谐波阻抗； R_5 和 L_5 为谐波源处等效谐波阻抗。选择谐波源处电压 u 作为系统的输出，补偿电流 i_{c1} 和 i_{c2} 作为系统的输入。

对图 1 电路列微分方程如下：

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{u_1 - u - R_3 i_3}{L_3} \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{u_2 - u - R_4 i_4}{L_4} \\ \frac{di_3}{dt} = \frac{u_1 - R_1 i_1}{L_1} \\ \frac{di_4}{dt} = \frac{u_2 - R_2 i_2}{L_2} \\ \frac{di_5}{dt} = \frac{u - R_5 i_5}{L_5} \\ u_1 = R_1 (i_{c1} - i_1) + L_1 \frac{d(i_{c1} - i_1)}{dt} \\ u_2 = R_2 (i_{c2} - i_2) + L_2 \frac{d(i_{c2} - i_2)}{dt} \\ u = R_5 (i_1 + i_2 + i_5) + L_5 \frac{d(i_1 + i_2 + i_5)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

此外，图 1 中补偿电流 i_{c1} 和 i_{c2} 由分布式电源的逆变器控制方式决定，本文采用文献[4]中基于逆变型分布式电源的谐波补偿方法，以补偿源 1 为例建立数学模型如图 2 所示。

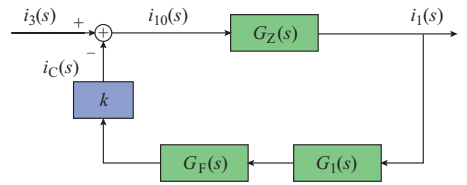


图 2 补偿源数学模型框图

Fig.2 Block diagram of mathematical model with compensating source

图 2 中： $G_1(s)$ 为谐波检测环节的传递函数，谐波增益为 1，基波增益为 0； $G_F(s)$ 为谐波电流生成环节的传递函数，可以等效成时间常数很小的一阶惯性环节； k 为补偿系数，完全补偿时 $k=1$ ； $i_c(s)$ 为逆变器直接输出的补偿电流； $i_3(s)$ 为补偿源 1 检测到的本地负载中流过的谐波电流； $i_{10}(s) = i_c(s) - i_3(s)$ ，不等于实际注入电网的补偿谐波电流 $i_1(s)$ 。

考虑到逆变器中 LC 滤波器电容支路的分流作用， $i_{10}(s)$ 与 $i_1(s)$ 之间的传递函数 $G_z(s)$ 可以近似的表示如下：

$$G_z(s) = \frac{1}{L_3 C s^2 + R_3 C s + 1} \quad (2)$$

式中： C 为滤波器电容。

综上可得补偿源 1 的闭环传递函数 $G_{c1}(s)$ 为：

$$G_{c1}(s) = \frac{G_z(s)}{1 + k G_z(s) G_F(s) G_1(s)} \quad (3)$$

同理，可求得补偿源 2 的闭环传递函数 $G_{c2}(s)$ 。对式(1)做 Laplace 变换并将由 $G_{c1}(s)$ 和 $G_{c2}(s)$ 确定的电流关系代入，可得多逆变器同时独立补偿谐波时系统的传递函数矩阵为：

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{R_1 + L_1 s + G_{c1}(s)(R_3 + L_3 s)}{1 + G_{c1}(s)} \\ \frac{R_2 + L_2 s + G_{c2}(s)(R_4 + L_4 s)}{1 + G_{c2}(s)} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

则 RGA 的表达为：

$$\mathbf{R}_{RGA} = \mathbf{G}(0) \otimes (\mathbf{G}(0)^*)^T = [\lambda_1 \quad \lambda_2] \quad (5)$$

式中： λ_1 和 λ_2 为参数； \otimes 表示 Hadamard 积； $*$ 表示矩阵的广义逆。

RGA 描述的是当其他控制加入时对原控制回路的影响， λ_1 反映补偿源 1 受补偿源 2 的影响程度， λ_2 反映补偿源 2 受补偿源 1 的影响程度。

由式(4)和式(5)可以看出，RGA 由 $\mathbf{G}(0)$ 决定，而 $\mathbf{G}(0)$ 的值与图 1 电路中的阻抗参数有关。令 $\mathbf{G}(0) = [g_1, g_2]$ ，图 3 给出了 $g_1 = 5$ 时 RGA 参数随 g_2 变化的仿真结果。

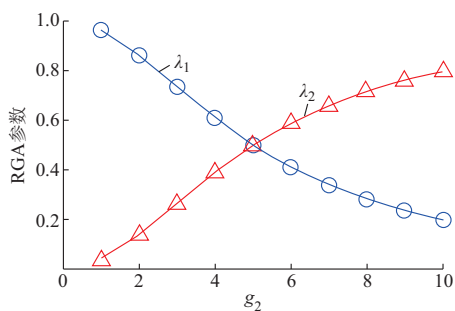


图3 RGA 参数仿真曲线

Fig.3 Simulation curves of RGA parameters

RGA 中 λ_1 或 λ_2 值越接近 1 说明控制回路受其他控制的影响越小,从图 3 中可以看出,2 个补偿源之间始终存在交互影响。此外, λ_1 与 λ_2 之和始终为 1,这是由 RGA 矩阵的性质决定的。图 3 中随着 g_2 的增大, λ_1 逐渐减小, λ_2 逐渐增大,说明补偿源 1 受补偿源 2 的影响越来越大,补偿源 2 受补偿源 1 的影响越来越小。当 $g_2 = g_1$ 时,2 个补偿源之间的影响程度是相同的。综上所述,执行独立控制的 2 个补偿源之间始终存在交互影响,交互影响的大小由电路的具体阻抗参数决定。

2 多逆变器电源协调的微电网谐波控制方法

利用微电网中的多个逆变器分布式电源同时控制谐波,需要首先选择一个谐波控制的目标节点。实际复杂网络中目标节点的选择十分重要,目标节点的电压波形将会得到很好的改善,但是其他节点都会存在残留谐波电压,目标节点的选择必须从微电网整体来考虑。

本文考虑 3 个因素确定目标节点,按照优先顺序分别为节点对电能质量的需求、节点的潮流和节点的度^[2]。在后续内容中,将给出选择谐波管理目标节点的实例并进行仿真分析。此处为了便于对问题的分析,采用图 1 中的简化模型,并选择谐波源所在节点为目标节点,使谐波控制的目标节点不在补偿电源处,与复杂网络中的情况一致,且有:

$$\dot{U} = Z_1 \dot{I}_{c1} + Z_2 \dot{I}_{c2} + Z_s \dot{I}_s \quad (6)$$

式中: \dot{U} , \dot{I}_{c1} , \dot{I}_{c2} , \dot{I}_s 分别为 u , i_{c1} , i_{c2} , i_s 的相量形式; Z_1 和 Z_2 分别为补偿源节点与目标节点之间的互阻抗; Z_s 为目标节点的自阻抗。

谐波控制的目标就是使目标节点的谐波电压 $|\dot{U}| = 0$,此时由 2 个补偿源发出的谐波完全抵消目标节点处的谐波电压。

当检测到目标节点的谐波电压为 $\Delta \dot{U}$ 时,谐波控制的目标就是协调控制补偿源输出谐波电流

$\Delta \dot{I}_{c1}$ 和 $\Delta \dot{I}_{c2}$,使

$$Z_1 \Delta \dot{I}_{c1} + Z_2 \Delta \dot{I}_{c2} = -\Delta \dot{U} \quad (7)$$

图 4 给出了上式中各谐波电压、电流的相量图。通过调整控制参数可使逆变电源的谐波阻抗较小,此时谐波电流较多的流向逆变电源处,检测到的谐波电流与补偿电流之间的相位偏差较小,图中补偿电流 $\Delta \dot{I}_{c1}$ 和 $\Delta \dot{I}_{c2}$ 的相角 θ_1 和 θ_2 可以通过检测补偿源本地的初始谐波电流得到。 θ_1 和 θ_2 在谐波源相位不发生突变的情况下其保持定值;在阻抗 Z_1 和 Z_2 已知的情况下, \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 的相角可以直接确定;在此基础上将 $\Delta \dot{U}$ 分解就可以确定所需的补偿量增量 $|\Delta \dot{I}_{c1}|$ 和 $|\Delta \dot{I}_{c2}|$ 。

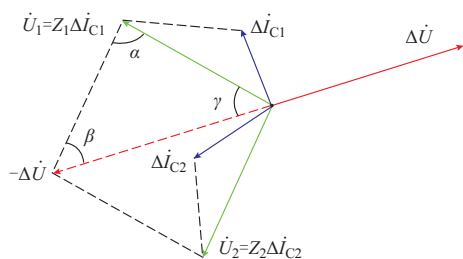


图4 谐波电压和电流相量图

Fig.4 Phasor diagram of harmonic voltage and current

通常情况下互阻抗参数不是已知的,需要进行估算。当网络结构确定之后,节点之间的互阻抗基本不变,所以本文在谐波控制前首先估算互阻抗参数 Z_1 和 Z_2 。

电力系统中各节点注入的谐波电流包含缓慢变化和快速变化分量。缓慢变化分量在一定时间段内具有较一致的变化趋势,各谐波电流分量之间存在较大的相关性;而快速变化分量体现负荷的短暂变化,各谐波电流分量之间可以看成是相互独立的^[15]。用下标 f 表示快速变化分量,将式(6)改写并推广到 N 个节点为:

$$\dot{U}_f = \sum_{j=1}^N Z_j \dot{I}_{jf} \quad (8)$$

式中: \dot{U}_f 为目标节点电压的快速变化分量; Z_j 为第 j 个节点与目标节点之间的互阻抗; \dot{I}_{jf} 为第 j 个节点注入谐波电流的快速变化分量。

以求解第 i 个节点与目标节点之间的互阻抗 Z_i 为例,对上式两端求数学期望并与原式相减,可得:

$$\dot{U}_f - E(\dot{U}_f) = Z_i (\dot{I}_{if} - E(\dot{I}_{if})) + \sum_{j=1, j \neq i}^N Z_j (\dot{I}_{jf} - E(\dot{I}_{jf})) \quad (9)$$

式中： $E(\cdot)$ 为数学期望。

通过测量得到的量有 \dot{U}_f 和 \dot{I}_{jf} ，求和项表示其他谐波源对 \dot{U}_f 的影响，无法直接求得。对式两端同时乘以 $\dot{I}_{jf} - E(\dot{I}_{jf})$ ，再求期望，可得：

$$E((\dot{U}_f - E(\dot{U}_f))(\dot{I}_{if} - E(\dot{I}_{if}))) = Z_i E((\dot{I}_{if} - E(\dot{I}_{if}))(\dot{I}_{if} - E(\dot{I}_{if}))) + \sum_{j=1, j \neq i}^N Z_j E((\dot{I}_{jf} - E(\dot{I}_{jf}))(\dot{I}_{if} - E(\dot{I}_{if}))) \quad (10)$$

式(10)中求和项变成第 i 个节点与其他节点注入谐波电流快速变化分量之间的协方差之和，值为 0。则可求得互阻抗为：

$$Z_i = \frac{E((\dot{U}_f - E(\dot{U}_f))(\dot{I}_{if} - E(\dot{I}_{if})))}{E((\dot{I}_{if} - E(\dot{I}_{if})))^2} \quad (11)$$

在实际计算过程中，上式中的期望值可以用样本的均值来代替，谐波电压和电流的快速变化分量可以通过简单的线性滤波实现。一般情况下节点之间的互阻抗变化很小，在谐波控制过程中不需要实时估算，但当系统的网络结构发生变化时可以采用同样的方法重新估算互阻抗。

假设 $Z_1 = |Z_1| \angle \varphi_1, Z_2 = |Z_2| \angle \varphi_2, \Delta \dot{U} = |\Delta \dot{U}| \angle \varphi_u$ ，则图 4 谐波电压相量三角形中有如下关系：

$$\begin{cases} \alpha = 360^\circ - \beta - \gamma \\ \beta = \theta_2 + \varphi_2 - \varphi_u - 180^\circ \\ \gamma = 180^\circ - \theta_1 - \varphi_1 + \varphi_u \end{cases} \quad (12)$$

根据正弦定理：

$$\frac{|\Delta \dot{U}|}{\sin \alpha} = \frac{|\dot{U}_1|}{\sin \beta} = \frac{|\dot{U}_2|}{\sin \gamma} \quad (13)$$

可得：

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{c1}| = \frac{|\Delta \dot{U}| \sin \beta}{|Z_1| \sin \alpha} \\ |\Delta \dot{I}_{c2}| = \frac{|\Delta \dot{U}| \sin \gamma}{|Z_2| \sin \alpha} \end{cases} \quad (14)$$

由此可以根据检测到的目标节点谐波电压 $\Delta \dot{U}$ 调整各个逆变电源的谐波补偿量 $\Delta \dot{I}_{c1}$ 和 $\Delta \dot{I}_{c2}$ ，实现多逆变电源之间的协调控制。

算法的整体原理框图如图 5 所示，其中虚线框中部分只在算法开始时进行一次估算，其输出在算法执行过程中使用。当微电网的网络结构发生变化或者谐波源的相位发生突变后需要重新估算，算法重新启动。算法给出的谐波补偿量分配需要结合具体的分布式电源逆变器控制方法实现。谐波电流是

从逆变电源连接支路提取出来的，利用瞬时无功功率理论对逆变器连接支路电流进行分析，提取其中的谐波分量，然后根据式(14)确定补偿量，形成最终的补偿电流^[5]。

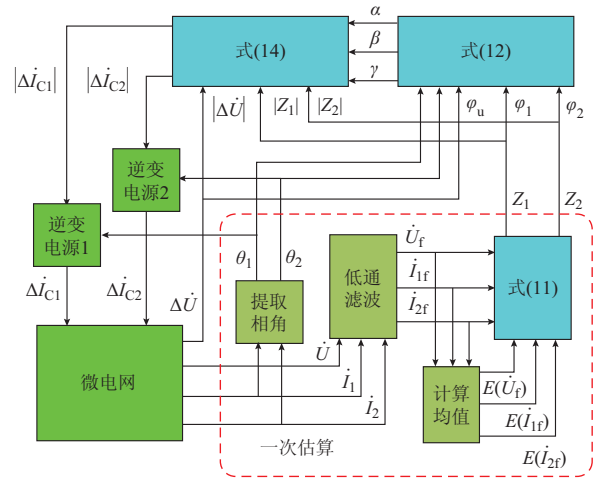


图 5 算法原理框图

Fig.5 Block diagram of algorithm principle

上述方法以 2 个逆变型分布式电源的交互影响分析以及协调控制为例，可以推广到更多电源协调的情况。当微电网中存在多个分布式电源可以进行谐波控制时，可以将式(7)中的补偿量分配方法进行推广，但此时补偿量的分配结果不再是唯一的，所以选择最终的补偿量分配方案需要考虑更多的因素。此外，当 2 个分布式电源就可以满足微电网的谐波控制时，也可以从中选择 2 个最合适的分布式电源对微电网的谐波进行管理。未来的研究中将对这一问题进行更深入的分析。

3 仿真实验分析

本文采用 PSCAD/EMTDC 工具软件对微电网中基于多逆变型分布式电源协调的微电网谐波管理方法进行仿真，共有 3 个算例。仿真采用如图 6 所示的辐射状微电网结构，其中单位线路电阻 $R = 0.641 \Omega/\text{km}$ ，电抗 $X = 0.101 \Omega/\text{km}$ 。节点 1 到节点 9 的主线路上节点间距离为 40 m，节点 2 和节点 10 间距离为 200 m，节点 3 和节点 15 间距离为 160 m，其余各条线路的长度均为 50 m。节点 10 和节点 17 处安装有逆变型分布式电源，分别记为逆变电源 1 和逆变电源 2。节点 13、节点 15 和节点 18 处接有三相整流负荷，节点 6、节点 14 至节点 18 处接有三相对称负荷。假设图中各节点对电能质量没有特殊的要求，只考虑流过节点的潮流和节点的度，选择节点 3 作为谐波控制的目标节点。

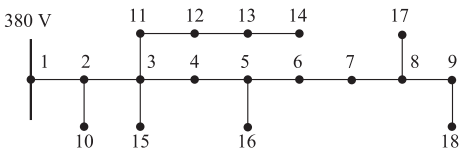


图 6 辐射状微电网结构

Fig.6 Structure of microgrid with radial

算例 1: 逆变器型分布式电源都采用独立补偿方式, 在 1 s 时刻开始进行谐波管理, 逆变器 1 单独补偿和逆变器 1 和逆变器 2 分别独立补偿情况下的仿真实验结果如图 7、图 8 所示。

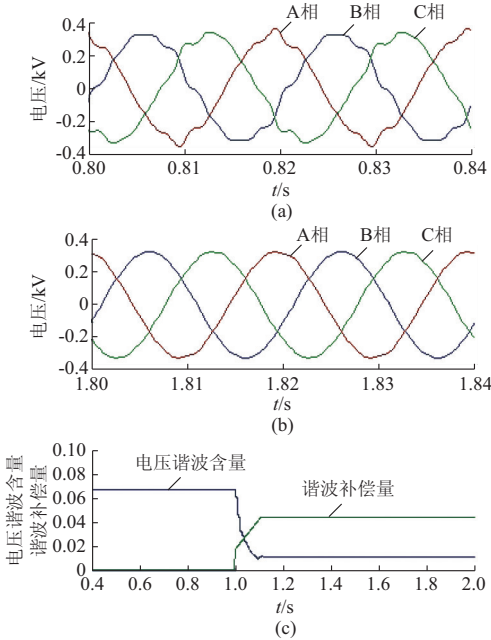


图 7 逆变器 1 独立补偿波形

Fig.7 Independent compensation curves with No. 1 inverter power supply

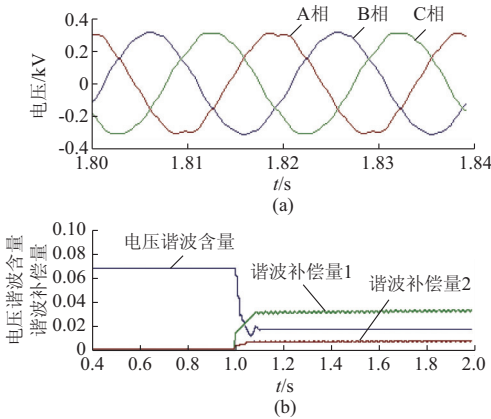


图 8 逆变器 1 和 2 分别独立补偿结果

Fig.8 Results of independent compensation respectively by No. 1 and No. 2 inverter power supplies

图 7 中前 2 个子图分别是逆变器 1 独立补偿时, 投入谐波管理前后的目标节点 3 相电压波形。从图中可以看出, 补偿后的电压波形有了很大的改善。第 3 个子图中给出了逆变器 1 的谐波补偿量和目标节点电压谐波含量(A 相)曲线。在逆变器 1 投入谐波管理之后, 大约经过 0.1 s 逆变器 1 的谐波补偿输出基本稳定, 电压波形的谐波含量大大降低, 但是仍然存在残留的谐波。

与图 7 相比, 图 8 的目标节点 3 相电压波形变差, 残留的电压谐波含量较多, 2 个逆变器的补偿量曲线不再平滑, 出现锯齿形的抖动, 这是 2 个逆变器之间负的交互影响造成的。严重时还可能在 2 个逆变器之间出现谐波环流导致谐波管理失败。

算例 2: 采用本文提出的方法, 对逆变器 1 和 2 进行协调控制, 仍然在仿真开始 1 s 后投入谐波管理, 仿真实验结果如图 9 所示。

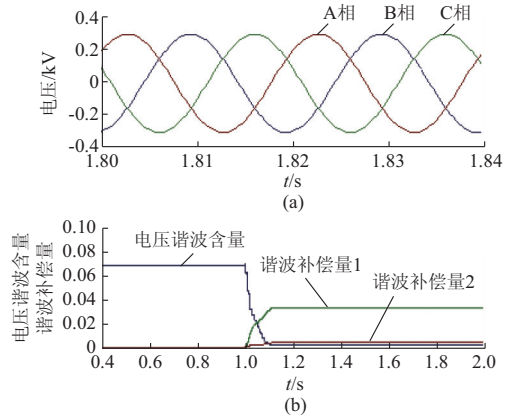


图 9 逆变器 1 和 2 进行协调控制

Fig.9 Coordinate control with No. 1 and No. 2 inverter power supplies

表 1 给出了逆变器与目标节点之间的互阻抗估计结果, 估计值与真实值的误差较小, 能够保证本文方法的正确执行。

表 1 逆变器与目标节点之间互阻抗估计结果
Table 1 Estimation results of mutual impedance between the target node and inverter power supply

逆变器	幅值/ Ω	幅值真实值/ Ω	角度/ $^\circ$	角度真实值/ $^\circ$
逆变器 1	0.011 4	0.011 9	9.05	9.83
逆变器 2	0.025 0	0.024 6	-171.02	-170.23

对比图 8 和图 9, 可以明显看出, 本文提出的方法能够有效的协调 2 个逆变器型分布式电源对微电网中的谐波进行管理。目标节点的谐波残留少于单个逆变器和 2 个逆变器分别独立补偿的情况。2 个逆变器的补偿量也不再出现锯齿形的抖动,

避免了负的交互影响。

算例 3:采用和算例 2 相同的实验条件,对比分析谐波控制目标节点选择对微电网整体电能质量的影响。不同目标节点选择时各节点总谐波畸变率 (THD)如表 2 所示。

表 2 不同目标节点选择时各节点 THD 对比
Table 2 THD comparison of different destination nodes

目标节点	THD/%						
	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5	节点 10	节点 11	节点 15
节点 15	0.021	0.019	0.019	0.019	0.025	0.022	0.002
节点 3	0.003	0.002	0.002	0.002	0.009	0.005	0.024
不补偿	0.065	0.066	0.066	0.064	0.072	0.069	0.061

对比表 2 中的数据,无论选择节点 15 还是节点 3 作为目标节点,附近各节点的 THD 都有所下降,全部降到原来的 50%以下。选择节点 3 作为目标节点时,以节点 15 电能质量为代价,节点 15 的 THD 只降低到 2.4%,明显高于以节点 15 为目标时的 0.2%。但是以节点 3 为控制目标时其他各节点处电能质量都明显优于以节点 15 为控制目标的情况。从微电网整体考虑,以节点 3 作为补偿目标节点是更好的选择,验证了本文采用的选择微电网谐波控制目标节点的方法。

4 结语

本文通过 RGA 方法对微电网谐波简化等效电路中 2 个逆变型分布式电源的交互影响进行了定量分析,结果表明执行独立控制的 2 个补偿源之间始终存在交互影响,会损害谐波补偿的效果。在此基础上,本文提出了一种多逆变型分布式电源共同管理微电网谐波的协调控制方法。该方法通过目标节点谐波电压相量分解和补偿量分配来实现 2 个逆变电源之间的协调,对充分利用微电网中的分布式电源提高电能质量具有重要的意义。仿真实验结果证明了本文方法的有效性。

本文提出的方法实现了 2 个逆变型分布式电源的协调,特别适用于网络结构参数不经常变化的微电网,进一步的研究将主要针对增加补偿电源的数量和提高算法的适应性。

参考文献

[1] SAO C K, LEHN P W. Voltage balancing of converter fed microgrids with single phase loads [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of the Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 1-7.

[2] 李国庆,王鹤,张慧杰.微电网中基于逆变电源控制的重要节点电能质量管理方法[J].电工技术学报,2014,29(2):177-184.
LI Guoqing, WANG He, ZHANG Huijie. Power quality management method based on inverter source control for

important node in microgrid [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 177-184.

[3] 裴玮,盛鹏,孔力,等.分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J].中国电机工程学报,2008,28(13):154-159.
PEI Wei, SHENG Kun, KONG Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 154-159.

[4] 李盛伟,李永丽,孙景钉,等.基于逆变型分布式电源控制策略的微电网电能质量控制方法[J].电网技术,2010,34(8):6-11.
LI Shengwei, LI Yongli, SUN Jingliao, et al. A power quality control algorithm for micro-grid based on control strategy of inverter interfaced distributed generator [J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 6-11.

[5] 曾正,赵荣祥,杨欢,等.多功能并网逆变器及其在微电网电能质量定制中的应用[J].电网技术,2012,36(5):58-67.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, YANG Huan, et al. A multi-functional grid-connected inverter and its application to customized power quality of microgrid [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 58-67.

[6] LI Yong, REHTANZ C, LUO Longfu, et al. Assessment and choice of input signals for multiple HVDC and FACTS wide-area damping controllers[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(4): 1969-1977.

[7] XU Liangde, DONG Ping, LIU Mingbo. A comparative analysis of the interaction between different FACTS and HVDC [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-5.

[8] 江全元,邹振宇,吴昊,等.基于相对增益矩阵原理的柔性交流输电系统控制器交互影响分析[J].中国电机工程学报,2005,25(11):23-28.
JIANG Quanyuan, ZOU Zhenyu, WU Hao, et al. Interaction analysis of facts controllers based on RGA principle [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 23-28.

[9] 黄柳强,郭剑波,孙华东,等.基于智能计算的多 FACTS 协调配置[J].电网技术,2013,37(4):942-946.
HUANG Liuqiang, GUO Jianbo, SUN Huadong, et al. Intelligent computation based coordinated configuration of multi-FACTS devices[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 942-946.

[10] ENSLIN J H R, HESKES P J M. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(6): 1586-1593.

[11] 张琳,曹一家.基于奇异值分解方法的 FACTS 交互影响分析[J].电力系统自动化,2008,32(5):20-23.
ZHANG Lin, CAO Yijia. Analysis on the interaction of FACTS controllers based on the SVD method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 20-23.

[12] 杨伟,曲艺,顾明星.基于 Gramian 的电力系统 FACT 元件交互影响分析[J].电力系统保护与控制,2011,39(22):30-34.
YANG Wei, QU Yi, GU Mingxing. Using Gramian to analyze the mutual influence of power system with FACTS[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 30-34.

[13] KANDULA R P, IYER A, DIVAN D. Stable operation of multiple power routers [C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 15-19, 2013, Denver, CO, USA: 1435-1442.

[14] 杜文娟,秦川,王海风,等.UPFC 控制的交互影响分析-可控参数域计算方法[J].电力系统自动化,2008,32(7):19-24.
DU Wenjuan, QIN Chuan, WANG Haifeng, et al. Interaction

analysis of unified power flow controller by computing the controllable parameter regions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 19-24.

[15] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 多谐波源条件下的谐波污染责任划分研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 48-54.

HUI Jin, YANG Honggeng, YE Maoqing. Research on the responsibility partition of harmonic pollution of multiple harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 48-54.

王 鹤(1983—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向: 微电网仿真与控制. E-mail: wanghe_nedu@163.com

李国庆(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统安全性分析与控制、电力系统继电保护和配电系统自动化。

李耀峰(1981—), 男, 工程师, 主要研究方向: 新能源发电技术。

(编辑 杨松迎)

A Coordination Control Method of Harmonic in Microgrid Based on Multiple Inverter Interfaced Distributed Generators

WANG He¹, LI Guoqing¹, LI Yaofeng², BI Peng³

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Jilin Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Supply Company, Jilin 132012, China;

3. Chengdu Power Supply Company of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610021, China)

Abstract: Despite the inverter interfaced distributed generator's capability of compensating for the harmonic current when outputting fundamental power, interaction takes place if compensation is made independently by multiple inverter interfaced distributed generators at the same time. A study is made of the interaction between two independent inverter interfaced generators using the relative gain array method, and a coordinated microgrid harmonic control method based on multiple inverter interfaced distributed generators is proposed. First, a bus is selected as the target bus of harmonic control in the microgrid. Secondly, the detected harmonic voltage phasor of the target bus is decomposed. Then the coordinated control for the multiple inverter interfaced distributed generators is achieved by allocating the compensation quantity. Simulation results show that the proposed method is able to effectively realize harmonic suppression in the microgrid by coordinating multiple inverter interfaced generators.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377016) and Jilin Province Technology Research & Development Program (No. 20130206038GX).

Key words: microgrid; distributed generators; inverter; harmonic compensation; coordinated control