

微电网中感-容性耦合逆变器功率不均等分配策略

曹华珍¹, 高 崇¹, 许志恒¹, 潘险险¹, 邓文扬²

(1. 广东电网有限责任公司 电网规划研究中心, 广东 广州 510030;

2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510640)

摘要:容性耦合逆变器(CCI)可有效提高无功功率调节能力,且具有更高的经济性。为了提高微电网系统无功调节的灵活度,建立了一种包含并联CCI和感性耦合逆变器(ICI)的新型混合微电网结构。探讨了CCI和ICI的功率特性;分析了微电网中功率分配比例对逆变器容量的影响;针对CCI缺乏实用化功率分配方案的问题,提出了一种CCI和ICI的不均等功率分配方法;进而结合算例研究了不均等功率分配比例的计算方法,并提出了功率控制方案;根据算例搭建了仿真模型和实验平台进行测试。仿真和实验结果表明,相比传统功率均分方法,所提出的方法可有效降低逆变器容量。

关键词:微电网;逆变器;功率分配;下垂控制

中图分类号:TM 464

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204032

0 引言

相较于传统发电系统,分布式发电DG(Distributed Generation)具有低损耗、高效率、环境友好等特点,是智能电网发展的重要特征,已成为大型电网未来的有力支撑和补充^[1-2]。微电网作为DG的有效载体,可充分发挥DG单元的应用调节潜力,提高用户供电质量和可靠性^[3-4],在我国碳达峰、碳中和的战略背景下,具有非常广阔的发展空间。

为了保证负载的正常运行,微电网与交流电网公共连接点PCC(Point of Common Coupling)电压的稳定非常重要^[5],这就要求作为DG核心单元的逆变器具有宽幅无功补偿能力,以应对负荷功率需求的波动。在传统微电网中,逆变器交流输出侧通过感性结构与PCC母线进行耦合,应用这种结构的逆变器被称为感性耦合逆变器ICI(Inductive Coupling Inverter)。ICI被广泛应用于基于DG的微电网中。这种逆变器具有宽幅有功功率传输能力,其无功补偿能力和直流电压与并网点电压的比例高度相关。比例越大,无功补偿范围越广^[6]。但是,高直流电压会造成高转换损耗,影响运行安全性^[5];此外,ICI的无功补偿能力也受DG输出容量的限制。因此,为保证系统的稳定运行和可靠的供电质量,微电网必须增加额外的无功补偿装置,如静止无功补偿器SVC(Static Var Compensator)等,这增加了微电网建造成本。

为了提高微电网的无功补偿能力,降低建造成

本和损耗,提高供电灵活性和运行安全性,一种利用容性耦合结构与电网耦合的容性耦合逆变器CCI(Capacitive Coupling Inverter)被提出^[7]。CCI最初以混合有源滤波器的形式出现在文献[8]中,后作为独立发电单元进行研究。包含多台并联逆变器的微电网,需要时刻根据负荷需求变化来调节功率输出^[9]。因此,逆变器间的功率分配对微电网的运行起着至关重要的作用。功率分配方法已有许多研究成果^[10-14]。其中,下垂控制由于能自动调节逆变器之间的功率分配,得到了广泛的研究和应用,然而基于下垂控制的功率分配精度会受到很多因素的影响,如馈线阻抗不匹配^[10-11]、馈线特性不一致^[12-13]以及不对称的本地负荷^[14]。研究者们提出了很多方法来改进下垂控制,以避免上述因素造成的功率分配精确度低的问题。为了补偿由馈线之间阻抗差异造成的功率分配误差,文献[10-12]提出一种虚拟阻抗控制环,通过特殊的参数设计,虚拟阻抗还可以调节馈线的阻性和容性,使多个逆变器保持良好的功率分配效果^[12-13]。此外,文献[15]通过对算法进行修改,提出一种增强型下垂控制方法来提高功率分配的精度。

然而,上述方法适用于仅安装ICI的微电网系统,在加入CCI后,由于不同的直流电压差异,2种逆变器的容量不相同,在传统的等功率分配方案下,不同逆变器的输出功率可能无法相同。另外,在功率均分的情况下,CCI在满足相同功率需求时的容量优势将无法得到有效体现。

为找出一个合适的功率分配比例,使系统始终以最小的逆变器容量运行,本文提出了一种不均分的功率分配方法,该方法可以快速而准确地计算并生成合适的功率分配比例。首先,介绍了CCI和ICI的潮流特性;其次,给出了混合微电网的潮流方程,研究了功率分配比例对微电网逆变器总容量的影

收稿日期:2021-04-23;修回日期:2022-04-01

在线出版日期:2022-04-11

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(031000QQ00200006)

Project supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co.,Ltd.(031000QQ00200006)

响;然后,提出了在最低系统损耗情况下功率分配比例的约束条件和计算方法,以及功率分配控制器;最后,通过仿真和实验验证了所提控制方法的有效性。

1 混合微电网中的并联逆变器

由于在耦合结构中串联了电容器,CCI具有更全面的无功调节能力,与ICI相比,降低了对直流电压幅值的要求。将CCI加入微电网以替代一部分ICI,可帮助微电网实现更灵活更宽幅的无功功率调节,降低逆变器的总容量和系统损耗。ICI和CCI的优缺点比较见表1。

表1 ICI和CCI的优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages between ICI and CCI

逆变器	有功输出特性	无功补偿特性	直流电压需求
CCI	耦合阻抗较大,同等直流电压下,有功输出范围较窄	同等直流电压下,对感性负载的无功补偿范围较宽	直流电压低于 $\sqrt{2}$ 倍母线电压时,可以实现有功输出及对感性负载的无功补偿
ICI	耦合阻抗较小,同等直流电压下,有功输出范围更宽	同等直流电压下,对感性负载的无功补偿范围较窄	直流电压低于 $\sqrt{2}$ 倍母线电压时,无法实现对感性负载的无功补偿

不同的耦合结构使2种逆变器的潮流特性呈现出显著差异。因此,对于包含2种逆变器的混合微电网,需要首先研究其功率潮流模型。

1.1 混合微电网的功率潮流模型

混合微电网中并联逆变器的等效电路见图1。

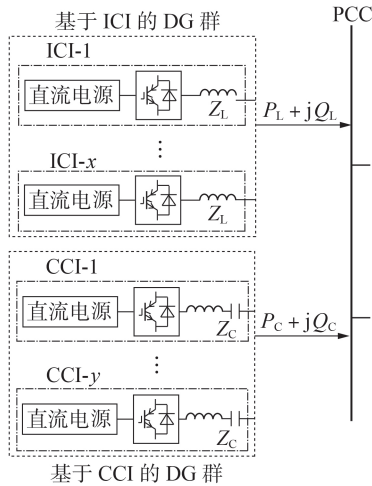


图1 混合微电网的等效结构图

Fig.1 Equivalent structure of hybrid microgrid

基于CCI和ICI的DG单元以不同的直流源耦合到PCC母线上。DG单元到电网的潮流方程为:

$$\begin{cases} P = \frac{VV_{pcc}}{Z} \cos(\theta - \delta) - \frac{V_{pcc}^2}{Z} \cos \theta \\ Q = \frac{VV_{pcc}}{Z} \sin(\theta - \delta) - \frac{V_{pcc}^2}{Z} \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 和 Q 分别为DG单元输出的有功功率和无功功率; V_{pcc} 和 V 分别为交流母线电压和逆变器输出电压; δ 为功率角; Z 和 θ 分别为耦合结构的阻抗值和阻抗角。

对于CCI和ICI不同的耦合结构, Z 和 θ 也有所不同,下文以 Z_c 、 θ_c 及 Z_L 、 θ_L 加以区分,分别如式(2)、(3)所示。

$$\begin{cases} Z_L = \omega L \\ \theta_L = 90^\circ \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} |Z_c| = \frac{1}{\omega C_c} = \frac{1}{\omega C} - \omega L_c \\ \theta_c = -90^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω 为角频率; L 和 L_c 分别为ICI和CCI串联电感; C_c 和 C 分别为CCI的等效电容和串联电容。为归一化功率潮流,式(4)定义了ICI和CCI的功率基准值 S_{base-L} 和 S_{base-C} 。

$$\begin{cases} S_{base-L} = \frac{V_{pcc}^2}{Z_L} \\ S_{base-C} = \frac{V_{pcc}^2}{|Z_c|} \end{cases} \quad (4)$$

如果将图1中所有ICI合并为1台ICI,所有CCI合并为1台CCI,则混合微电网的输出功率如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} P_L \\ Q_L \\ P_C \\ Q_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sin \delta}{V_{pcc}} S_{base-L} & 0 \\ \frac{\cos \delta}{V_{pcc}} S_{base-L} & \frac{\sin \delta}{V_{pcc}} S_{base-C} \\ 0 & -\frac{\cos \delta}{V_{pcc}} S_{base-C} \\ 0 & \frac{\sin \delta}{V_{pcc}} S_{base-C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -S_{base-L} \\ 0 \\ S_{base-C} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: P_L 和 Q_L 分别为ICI输出的有功功率和无功功率; P_C 和 Q_C 分别为CCI输出的有功功率和无功功率; V_L 和 V_C 分别为ICI和CCI的输出电压。

1.2 功率输出范围

一般而言,逆变器的功率控制范围会被3个因素影响,包括耦合阻抗的属性(感性或容性)、输出电压和耦合结构的等效阻抗值。后文对混合微电网优势的讨论将集中在这3个方面。此外,由于逆变器的输出电压与直流电压成正比,因此,在接下来的讨论中,这2个电压将不加以区分。

ICI和CCI的主要区别在于耦合阻抗的属性,属性的差异使这2种逆变器具有不同的功率输出特性。如果规定有功注入和对负载的无功补偿方向为正,ICI和CCI的功率基准值以及直流电压都相等,且直流电压高于 $\sqrt{2}V_{pcc}$,则ICI和CCI的功率输出范围可被看作是圆心在其功率基准值上、半径分别为 $V_{pcc}V_L/Z_L$ 和 $V_{pcc}V_C/Z_C$ 的圆。2种逆变器各自的功率输出范围和混合微电网的功率输出范围如附录A图A1所示,作为对比的传统并联ICI微电网的功率输

出范围如附录 A 图 A2 所示。可以看出:对于混合微电网及传统微电网,其有功功率的传输最大值是相同的;但是,相较于传统微电网,混合微电网的无功功率补偿范围要大得多。这就意味着,混合微电网维持 PCC 电压稳定方面的能力更强。

除了耦合阻抗属性带来的影响外,逆变器的输出电压也会影响功率的传输。ICI 和 CCI 功率输出范围受输出电压变化的影响如附录 A 图 A3 所示。由图可知,CCI 可以在输出电压较低的情况下实现宽范围的无功补偿,这样就降低了 CCI 对直流电压的需求,从而提高了微电网系统无功补偿的自适应性和灵活性。本文中,为简化讨论,逆变器耦合结构的等效阻抗将用功率基准值 S_{base} 代替。实际上,CCI 的功率基准值通常设置为与微电网的平均无功补偿需求相等。为更好地讨论混合微电网的功率特性,在下文中,本文以 CCI 的功率基准值为参考,ICI 与 CCI 功率基准值的比例为 λ ,即:

$$\frac{S_{base-L}}{\lambda} = S_{base-C} = S_{base} \quad (6)$$

如果不考虑为储能单元充电,则混合微电网的功率输出边界如表 2 所示。

表 2 混合微电网的功率输出边界

Table 2 Power output boundaries of hybrid microgrid

逆变器	功率输出边界
ICI	$0 \leq P_L \leq \frac{V_L}{V_{pcc}} \lambda S_{base}$
	$\left(\frac{V_L}{V_{pcc}} - 1 \right) \lambda S_{base} \leq Q_L \leq \left(\frac{V_L}{V_{pcc}} + 1 \right) \lambda S_{base}$
CCI	$0 \leq P_C \leq \frac{V_C}{V_{pcc}} S_{base}$
	$\left(1 - \frac{V_C}{V_{pcc}} \right) S_{base} \leq Q_C \leq \left(\frac{V_C}{V_{pcc}} + 1 \right) S_{base}$

综上所述,本文提出的混合并联 ICI 和 CCI 的微电网系统能够实现相比传统 ICI 并联微电网系统更宽的无功补偿范围;同时,由于 CCI 能够在较低的直流电压下工作,与传统微电网相比,混合微电网在适当的功率分配比例下可以降低逆变器总容量,从而降低总功率损耗,延长使用寿命。

2 混合微电网的功率分配

2.1 功率分配比例

若定义 m 、 n 分别为混合微电网系统的有功、无功功率分配比例,则在满足负荷需求时,混合微电网中 ICI 和 CCI 的功率输出可以描述为:

$$\begin{cases} P_L = m P_{out} \\ Q_L = n Q_{out} \\ P_C = (1-m) P_{out} \\ Q_C = (1-n) Q_{out} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{out} 和 Q_{out} 分别为混合微电网向 PCC 输出的有功功率和无功功率。

另外,为归一化负荷的功率需求,功率参考系数 r_p 和 r_q 定义如下:

$$\begin{bmatrix} P_{out} \\ Q_{out} \end{bmatrix} = S_{base} \begin{bmatrix} r_p \\ r_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

ICI 和 CCI 的容量分别被定义为 S_L 和 S_C ,并可由式(9)推导得到。

$$\begin{cases} S_L = V_L i_L \\ S_C = V_C i_C \end{cases} \quad (9)$$

式中: i_L 和 i_C 分别为 ICI 和 CCI 的输出电流,计算公式如式(10)所示。

$$\begin{cases} i_L = \frac{\sqrt{P_L^2 + Q_L^2}}{V_{pcc}} = \frac{\sqrt{(m P_{out})^2 + (n Q_{out})^2}}{V_{pcc}} \\ i_C = \frac{\sqrt{P_C^2 + Q_C^2}}{V_{pcc}} = \frac{\sqrt{[(1-m) P_{out}]^2 + [(1-n) Q_{out}]^2}}{V_{pcc}} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(9)和式(10)可得,对于给定的一组有功和无功参考值,功率分配比例将极大影响逆变器的容量。

2.2 功率分配比例对逆变器容量的影响

为了更好地评估功率分配比例对逆变器容量的影响,本文进行了算例研究。

假设 ICI 的功率基准值为 CCI 的 3 倍;同时 ICI 和 CCI 的直流电压与 PCC 电压之比分别为 1.5 和 0.7。4 个算例中的功率参考系数如表 3 所示。

表 3 算例中的功率参考系数

Table 3 Power reference coefficients in case

算例	功率参考系数
1	$r_p = 1.8, r_q = 0.35$
2	$r_p = 1.4, r_q = 1$
3	$r_p = 0.7, r_q = 0.35$
4	$r_p = 0.7, r_q = 1.6$

为较全面地通过算例研究功率分配比例对逆变器容量的影响,每个算例中的功率参考系数尽可能地考虑到了各种可能的负荷需求。每组功率参考系数在功率平面上的位置如图 2 所示。算例 1 的有功功率参考系数远大于无功功率参考系数,算例 2—4 中,有功功率参考系数与无功功率参考系数相差不大,均分布在 CCI 输出功率范围之外。为了使混合微电网在满足负荷需求时始终以最小的逆变器容量工作,在得到总功率需求参考值后,因为直流电压较低,CCI 发出的电流应尽可能大;同时,CCI 发出的电流和 ICI 发出的电流之比应满足式(11)。

$$\frac{i_C}{i_L} \leq \frac{V_L}{V_C} \quad (11)$$

将每个算例的功率参考系数代入式(10),可得到 ICI 电流随不同的功率分配比例而变化的三维图见附

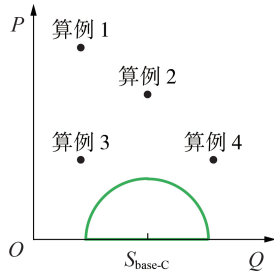


图2 不同算例中功率参考系数的位置
Fig.2 Locations of power reference coefficient in different cases

录A图A4。由图可知,功率分配比会严重影响ICI的输出电流幅值。另外,最低点总是位于 $m-n$ 平面的 $(0,0)$ 处,该点意味着在数学计算中,算例1—4中的ICI不应该输出任何电流。但是,由于直流电压和功率基准值的限制,单台CCI无法满足负荷功率需求。因此,需找到一个合适的功率分配比,既能使微电网满足功率需求,又能使ICI发出的电流尽可能小。

3 不均等功率分配方法

如上所述,功率分配比例对逆变器总容量有很大的影响。因此,找到一个合适的功率分配比例,以使混合微电网在满足负荷需求时保持最低的逆变器容量非常重要。本节研究了这种不均等功率分配比例的计算方法。

3.1 功率分配比例限制

逆变器的输出电压和PCC电压严重限制了逆变器容量。式(12)描述了电压与功率的关系。

$$\begin{cases} \sqrt{\left(1 + \frac{Q_L}{3S_{base}}\right)^2 + \left(\frac{P_L}{3S_{base}}\right)^2} \leq \frac{V_{DC-L}}{\sqrt{2} V_{pcc}} \\ \sqrt{\left(1 - \frac{Q_C}{S_{base}}\right)^2 + \left(\frac{P_C}{S_{base}}\right)^2} \leq \frac{V_{DC-C}}{\sqrt{2} V_{pcc}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: V_{DC-L} 和 V_{DC-C} 分别为ICI和CCI的直流电压。

因此可得功率分配比例边界,如式(13)所示。

$$\begin{cases} \sqrt{(1+nr_q)^2 + (mr_p)^2} \leq \frac{V_{DC-L}}{\sqrt{2} V_{pcc}} \\ \sqrt{[1-(1-n)r_q]^2 + [(1-m)r_p]^2} \leq \frac{V_{DC-C}}{\sqrt{2} V_{pcc}} \end{cases} \quad (13)$$

3.2 功率分配比例计算

为探究功率分配比例的计算方法,绘制算例1—4的电流的矢量分解图如图3所示。图中: i_{L-e} 为在传统平均功率分配算法中ICI的输出电流; i_{p-ref} 和 i_{q-ref} 分别为参考电流的有功分量和无功分量; i_{qC} 为当CCI的无功补偿量与功率基准值相等时的无功电流分量; r_c 为CCI功率范围圆半径。图3中的半圆为CCI的功率输出范围,其圆点在功率基值 S_{base} 处。坐

标系原点和功率参考值在图中分别被标记为 α_1 和 α_3 ,这两点的极坐标表示如下:

$$\begin{cases} \vec{\alpha}_1 = 0 + j0 \\ \vec{\alpha}_3 = i_{q-ref} + ji_{p-ref} \end{cases} \quad (14)$$

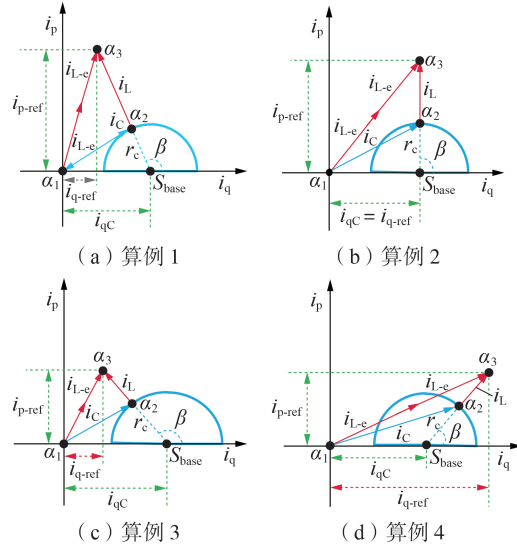


图3 不同算例的电流的矢量分解图

Fig.3 Vector decomposition graphs of current for different cases

为保证混合微电网在逆变器总容量上对传统微电网的优势,应有:

$$S_L + S_C < S_{equal} \quad (15)$$

式中: S_{equal} 为传统微电网的逆变器总容量。

为简化计算,本文中传统微电网的并联ICI数量为2,则 i_{L-e} 可由式(16)计算得到。

$$i_{L-e} = \frac{\sqrt{r_p^2 + r_q^2}}{2V_L} \quad (16)$$

i_{p-ref} 和 i_{q-ref} 可由式(17)计算得到。

$$\begin{cases} i_{p-ref} = \frac{r_p}{V_{pcc}} S_{base} \\ i_{q-ref} = \frac{r_q}{V_{pcc}} S_{base} \end{cases} \quad (17)$$

i_{qC} 可由式(18)计算得到。

$$i_{qC} = \frac{S_{base}}{V_{pcc}} \quad (18)$$

r_c 可由式(19)计算得到。

$$r_c = \frac{V_C}{V_{pcc}^2} S_{base} \quad (19)$$

在混合微电网系统中,因为直流电压较高,ICI的输出电流应该尽可能小;由几何原理可知,圆外一点到圆最短距离等于该点与圆心的距离减去圆半径。因此,在图3中,ICI的输出电流 i_L 即为在各自给定功率参考值下的最小值。 i_L 与CCI功率输出范围圆的交点标记为 α_2 ,该点同时也是CCI在给定功率

参考值时发出最大电流与功率范围圆的交点。因此,找到 α_2 的具体位置坐标,就可以求得给定功率参考值下的对应最小逆变器容量的功率分配比例。假设 r_c 与横轴的夹角为 β ,则功率分配比例可根据下列不同情况进行计算。

当 $r_q > 1$ 时,有:

$$\vec{\alpha}_2 = \left(r_c \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \beta}} + i_{qC} \right) + j \left(r_c \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \tan^2 \beta}} \right) \quad (20)$$

式中: $\tan \beta = \frac{i_{p-ref}}{i_{q-ref} - i_{qC}}$ 。

当 $r_q < 1$ 时,有:

$$\vec{\alpha}_2 = \left(i_{qC} - r_c \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \beta}} \right) + j \left(r_c \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \tan^2 \beta}} \right) \quad (21)$$

式中: $\tan \beta = \frac{i_{qC} - i_{q-ref}}{i_{p-ref}}$ 。

当 $r_q = 1, \beta = 90^\circ$ 时,有:

$$i_{qC} = i_{q-ref}$$

此时, $\vec{\alpha}_2$ 为:

$$\vec{\alpha}_2 = i_{qC} + j i_{p-ref} \quad (22)$$

i_C 和 i_L 可根据 $\vec{\alpha}_1 - \vec{\alpha}_3$ 计算得到,即:

$$\begin{cases} i_L = \vec{\alpha}_3 - \vec{\alpha}_2 \\ i_C = \vec{\alpha}_2 - \vec{\alpha}_1 \end{cases} \quad (23)$$

同时,传统ICI并联微电网的逆变器总容量可由式(24)计算得到。

$$S_{equal} = 2S_{L-e} = V_L i_{L-e} \quad (24)$$

式中: S_{L-e} 为传统ICI并联微电网中单台逆变器的容量。混合微电网中 n 台逆变器总容量可由式(25)计算得到。

$$S_n = S_{L-n} + S_{C-n} = V_L i_L + V_C |i_C| \quad (25)$$

不同情况下不均等功率分配方法的分配比例的计算公式如下。

当 $r_q > 1$ 时,有:

$$\begin{cases} m = \frac{\left(i_{p-ref} - r_c \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \tan^2 \beta}} \right) V_L}{r_p S_{base}} \\ n = \frac{\left[i_{q-ref} - \left(r_c \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \beta}} + i_{qC} \right) \right] V_L}{r_q S_{base}} \end{cases} \quad (26)$$

当 $r_q < 1$ 时,有:

$$\begin{cases} m = \frac{\left(i_{p-ref} - r_c \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \tan^2 \beta}} \right) V_L}{r_p S_{base}} \\ n = \frac{\left[i_{q-ref} - \left(i_{qC} - r_c \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \beta}} \right) \right] V_L}{r_q S_{base}} \end{cases} \quad (27)$$

当 $r_q = 1$ 时,有:

$$\begin{cases} m = \frac{\left(i_{p-ref} - \frac{V_L}{V_{pcc}^2} S_{base} \right) V_L}{r_p S_{base}} \\ n = 0 \end{cases} \quad (28)$$

3.3 不均等功率分配方法效果验证

根据式(14)~(28),可以得到算例1~4的功率分配比例。因此,可以计算出本文所提出的不均等功率分配方法和传统功率均分方法下对应的逆变器容量 S/S_{base} ,如表4所示。对比表明,本文所提出的不均等功率分配方法可以有效地降低系统的逆变器容量。

表4 不同微电网系统的逆变器容量比较

Table 4 Comparison of inverter's capacity among different microgrid systems

算例	S/S_{base}		m	n
	功率均分方法	不均等功率分配方法		
1	2.7546	1.9812	1	-0.16
2	3.4181	1.5463	0.69	0
3	2.9984	0.7913	0.87	-0.18
4	3.1026	1.0675	0.51	-0.94

4 仿真及实验验证

本文所提出的不均等功率分配方法旨在使混合微电网逆变器在满足负荷需求情况下以最小容量工作,并保证精确的功率追踪。由于逆变器总容量不能通过测试结果得到,因此本节所有的测试都严格按照算例进行设置,结果可以证明所提出的不均等功率分配方法下的功率传输是准确的。

4.1 仿真验证

本文利用 MATLAB / Simulink 搭建了仿真模型并通过仿真测试来验证不均等功率分配方法的有效性。仿真测试基于算例1~4,控制框图见附录B图B1,仿真参数见附录B表B1。所有测试都将应用传统的ICI并联功率均分方法和不均等功率分配算法。

采用混合微电网结构和不均等功率分配方法的仿真结果见附录B图B2;采用传统ICI并联微电网和功率均分方法的仿真结果见附录B图B3。功率参考值在1.5 s时变化。结果表明,本文所提出的不均等功率分配方法是有效的,输出功率可以平滑准确地跟踪参考功率。

4.2 实验验证

为了在硬件层面验证不均等功率分配方法的有效性,在实验室中搭建了附录B图B4所示的实验平台。样机的参数配置与仿真模型相同。所有测试都遵循仿真参数设置。作为对比,实验平台也在并联ICI微电网上应用传统功率均分方法进行了测试。实验结果如图4、5所示,亦证明了本文所提出的不均等功率分配方法的有效性。

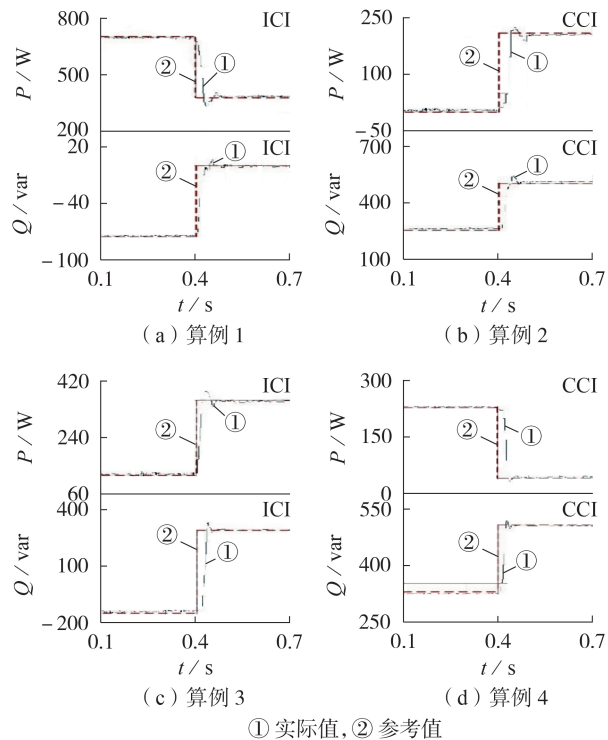


图4 应用不均等功率分配方法的实验结果
Fig.4 Experimental results under unequal power sharing control method

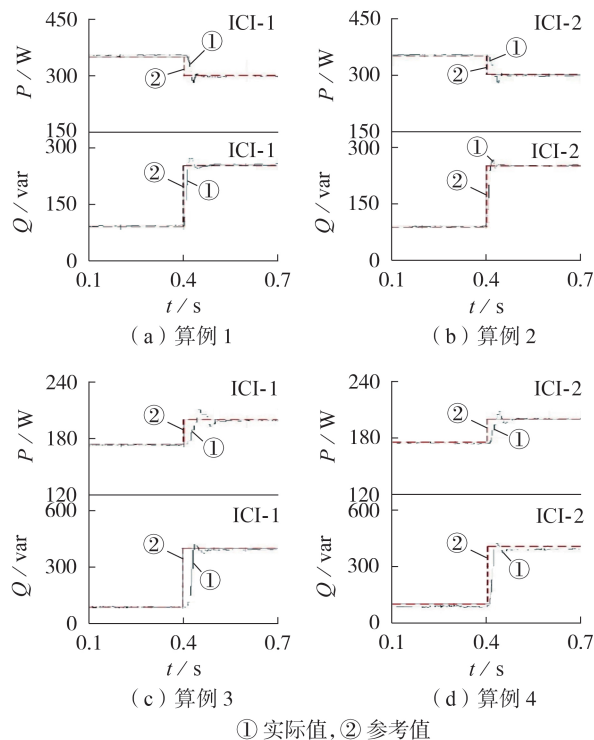


图5 应用传统功率分配方法的实验结果
Fig.5 Experimental results under traditional power sharing control method

5 结论

CCI是一种增强了无功补偿能力的耦合逆变

器。相较于传统耦合逆变器ICI,CCI可在较低直流电压下实现较宽范围的无功补偿。此外,相较于静止无功发生器、静止同步补偿器以及基于晶闸管的SVC等传统无功补偿设备,CCI可在完成高精度动态无功补偿的基础上实现有功输出。美中不足的是,CCI的等效耦合阻抗较大,会影响有功功率输出范围。因此,本文提出了一种应用ICI和CCI的混合微电网结构。相较于传统微电网,该结构可大幅提高微电网无功补偿及保持母线电压稳定的能力。考虑到CCI可在较低直流电压下实现功率输出,为降低混合微电网中逆变器的总容量和传输损耗,本文还提出了不均等功率分配方法。仿真和实验结果可以证明:在满足相同功率要求时,混合微电网可有效降低对逆变器的容量需求;应用不均等功率分配方法,混合微电网可在给定功率参考值时以最小逆变器容量输出功率。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张勇军,张懿恒,刘斯亮,等.考虑分布式光伏与储能接入的配变双层规划[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):9-15.
ZHANG Yongjun,ZHANG Siheng,LIU Siliang,et al. Dual planning of a distribution transformer considering the impact of distributed photovoltaics and energy storage access[J]. Power System Protection and Control,2020,48(24):9-15.
- [2] 王逸超,罗安,金国彬.微网逆变器的改进鲁棒下垂多环控制[J].电工技术学报,2015,30(22):116-123.
WANG Yichao,LUO An,JIN Guobin. Improved robust droop multiple loop control for parallel inverters in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(22):116-123.
- [3] 陈冰,刘子文,简翔浩,等.基于扰动跟踪的交直流微电网互联变流器自适应反推控制策略[J].电力自动化设备,2020,40(6):56-62.
CHEN Bing,LIU Ziwen,JIAN Xianghao,et al. Adaptive backstepping control strategy of ILC in AC/DC microgrid based on disturbance tracking[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(6):56-62.
- [4] 周保荣,黄廷城,张勇军.计及激励型需求响应的微电网可靠性分析[J].电力系统自动化,2017,41(13):70-78.
ZHOU Baorong,HUANG Tingcheng,ZHANG Yongjun. Reliability analysis on microgrid considering incentive demand response[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(13):70-78.
- [5] DENG Wenyang,DAI Ningyi,LAO Kengweng,et al. A virtual-impedance droop control for accurate active power control and reactive power sharing using capacitive-coupling inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2020,56(6):6722-6733.
- [6] LAO Kengweng,DENG Wenyang,SHENG Jingjing,et al. PQ-coupling strategy for droop control in grid-connected capacitive-coupled inverter[J]. IEEE Access,2019,7(6):31663-31671.
- [7] DAI Ningyi,ZHANG Wenchen,WONG Manchung,et al. Analysis, control and experimental verification of a single-phase capacitive-coupling grid connected inverter[J]. IET Power Electronics,2015,8(5):770-782.

- [8] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [9] 肖湘宁,王鹏,陈萌. 基于分布式多代理系统的孤岛微电网二次电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1894-1902. XIAO Xiangning, WANG Peng, CHEN Meng. Secondary voltage control in an islanded microgrid based on distributed multiagent system [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1894-1902.
- [10] 韦佐霖,陈民铀,李杰,等. 孤岛微网中分布式储能SOC和效率均衡控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 169-177. WEI Zuolin, CHEN Minyou, LI Jie, et al. Balancing control strategy of SOC and efficiency for distributed energy storage in islanded microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 169-177.
- [11] 孙孝峰,郝彦丛,赵巍,等. 孤岛微电网无通信功率均分和电压恢复研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 55-61. SUN Xiaofeng, HAO Yancong, ZHAO Wei, et al. Research of power sharing and voltage restoration without communication for islanded microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 55-61.
- [12] 郑连清,庄琛,马世强,等. 微电网改进负荷功率分配策略与并网稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 17-23. ZHENG Lianqing, ZHUANG Chen, MA Shiqiang, et al. Improved load power allocation strategy for microgrid and grid-connection stability analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 17-23.
- [13] 郭倩,林燎源,武宏彦,等. 考虑自适应虚拟阻抗的微电网分布式功率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 23-29. GUO Qian, LIN Liaoyuan, WU Hongyan, et al. Distributed power control strategy for microgrids considering adaptive virtual impedance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 23-29.
- [14] 余志文,艾芊. 基于多智能体一致性的微电网自适应下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 150-156. YU Zhiwen, AI Qian. Adaptive droop control strategy for microgrid based on consensus of multi-agent system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 150-156.
- [15] ZHOU J, CHENG P. A modified Q-V droop control for accurate reactive power sharing in distributed generation microgrid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 4100-4109.

作者简介:



曹华珍

曹华珍(1974—),女,高级工程师,硕士,主要研究方向为配电网规划、电力系统规划设计及系统分析(E-mail: 729875469@qq.com);

邓文扬(1990—),男,博士,通信作者,主要研究方向为分布式发电协调控制(E-mail: dwyang@scut.edu.cn)。

(编辑 李莉)

Unequal power sharing method for ICI & CCI in hybrid microgrid

CAO Huazhen¹, GAO Chong¹, XU Zhiheng¹, PAN Xianxian¹, DENG Wenyang²

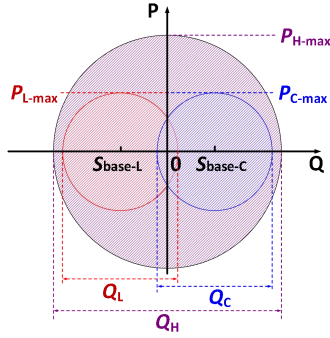
(1. Grid Planning & Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510030, China;

2. Guangzhou Power Electrical Engineering Technology Co., Ltd., Guangzhou 510640, China)

Abstract: CCI (Capacitive Coupling Inverter) can effectively improve the reactive power regulation ability, and has higher economy. In order to improve the flexibility of reactive power regulation of the microgrid system, a new hybrid microgrid structure including parallel-connected CCI and ICI (Inductive Coupling Inverter) is established. The power characteristics of CCI and ICI are discussed. Then, the influence of power sharing ratio on inverter capacity in microgrid is analyzed. In order to solve the problem of lack of practical power sharing method for CCI, an unequal power sharing method for CCI & ICI is proposed. Based on the case study, the calculation method of unequal power sharing ratio is studied, and the power control method is proposed. The simulation model and experimental platform are built to test, and the results prove that the proposed method can effectively reduce the inverter capacity compared with the traditional equal power sharing method.

Key words: microgrid; electric inverters; power sharing; droop control

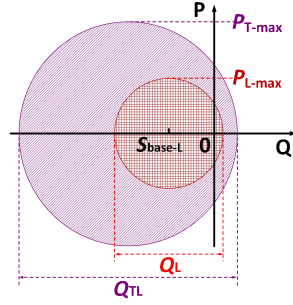
附录 A



注: P_{L-max} 和 P_{C-max} 分别为 ICI 和 CCI 输出的最大有功功率; Q_L 和 Q_C 分别为 ICI 和 CCI 的无功补偿值; P_{H-max} 和 Q_H 分别为混合系统的最大有功输出和无功补偿范围。

图 A1 混合微电网的功率输出范围

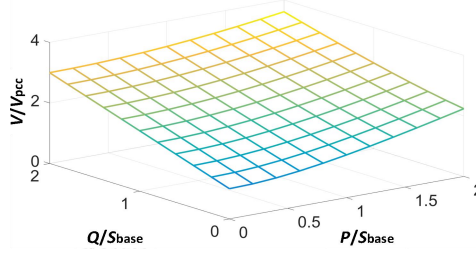
Fig.A1 Power transfer range of hybrid microgrid



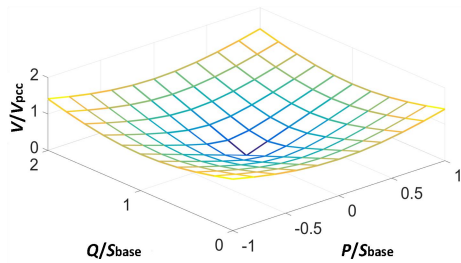
注: P_{T-max} 和 Q_{TL} 分别为传统 ICI 并联微电网的最大有功输出和无功补偿范围。

图 A2 传统微电网的功率输出范围

Fig.A2 Power transfer range of traditional microgrid



(a) ICI



(b) CCI

图 A3 ICI 和 CCI 功率输出范围随输出电压变化情况

Fig.A3 Power transfer range varies with the different output voltage of ICI and CCI

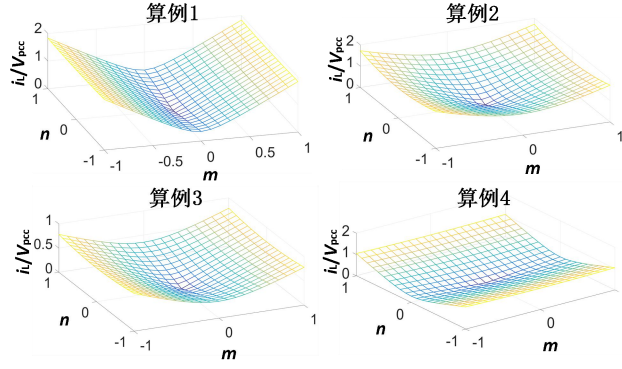
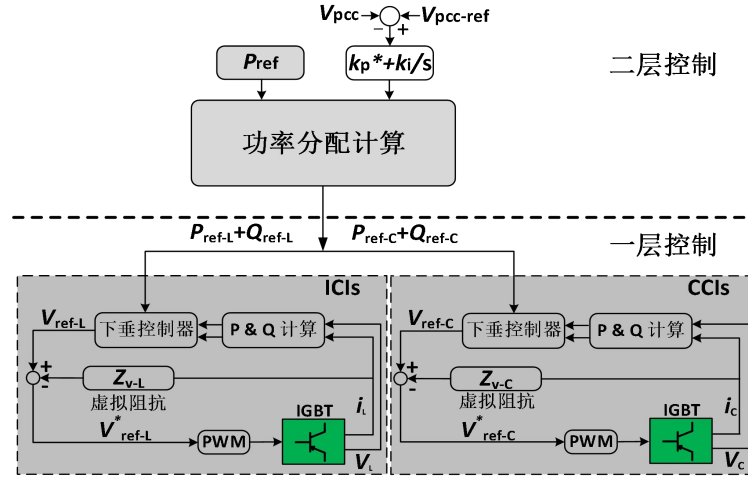


图 A4 ICI 输出电流在不同功率分配比例下的变化

Fig.A4 Output current of ICI varies with different power sharing ratio values

附录 B



注： V_{pcc} 和 $V_{pcc-ref}$ 分别为实际母线电压和母线电压参考值， P_{ref} 、 P_{ref-L} 和 P_{ref-C} 分别为微电网总有功参考值、 ICI 有功参考值和 CCI 有功参考值， Q_{ref-L} 和 Q_{ref-C} 分别为 ICI 和 CCI 的无功参考值； V_{ref-L} 和 V_{ref-C} 分别为 ICI 和 CCI 的输出电压；
 V_{ref-L}^* 和 V_{ref-C}^* 分别为 ICI 和 CCI 的输出参考电压。

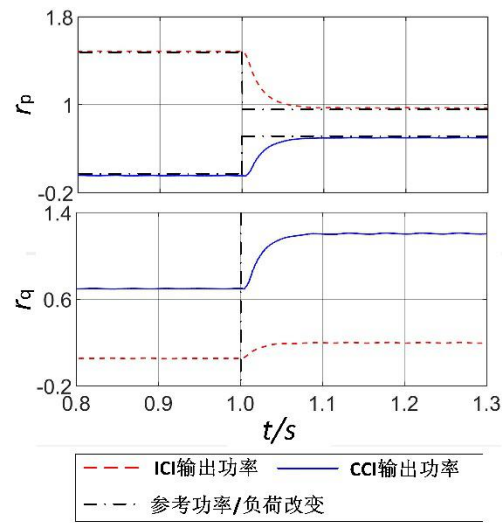
图 B1 本文提出的控制方法框图

Fig.B1 Block diagram of proposed control method

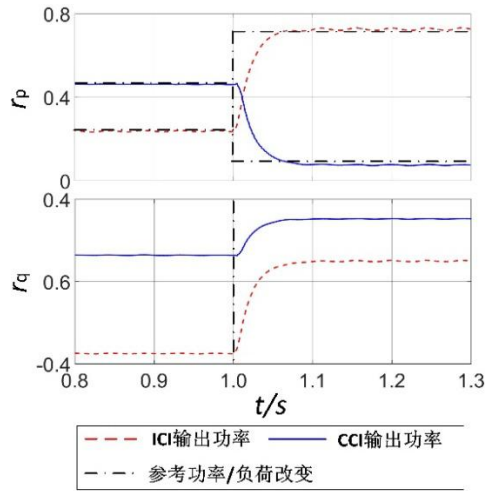
表 B1 仿真系统参数

Table B1 Parameters of simulation system

对象	参数	数值
系统	V_{PCC}	100V / 50 Hz
ICI	V_{DC-L}	170 V
	L_i	4 mH
	X_i	1.25Ω
	S_{base-L}	9680 var
	有功传输	1.1 S_{base-L}
	无功补偿	0.1 S_{base-L}
CCI	V_{DC-C}	80 V
	L_c	2mH
	C_c	340 μF
	X_c	8.73 Ω
	S_{base-C}	1210 var
	有功传输	0.5 S_{base-C}
	无功补偿	(0.5~1.5) S_{base-C}



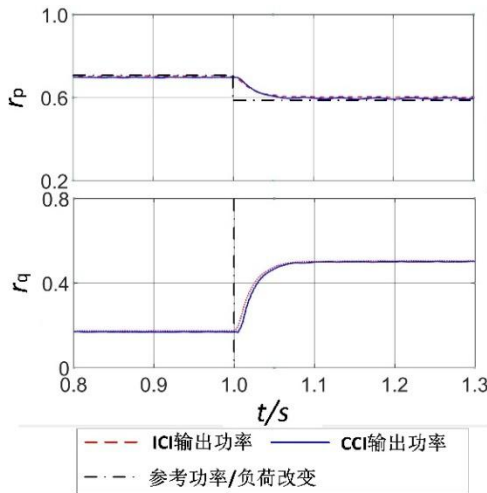
(a) 算例 1、2



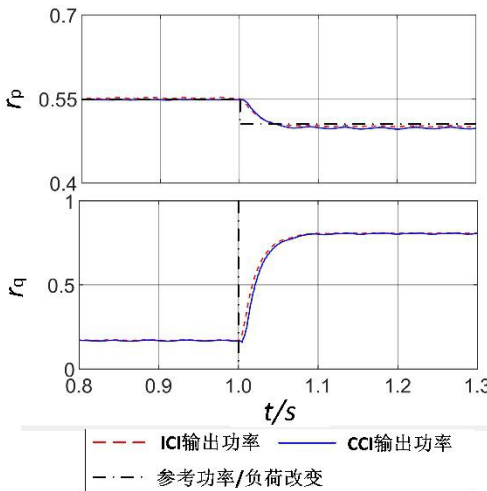
(b) 算例 3、4

图 B2 应用不均等功率分配算法的仿真结果

Fig.B2 Simulative results with proposed power sharing control method



(a) 算例 1、2



(b) 算例 3、4

图 B3 应用传统功率分配算法的仿真结果

Fig.B3 Simulative results with traditional power sharing control method

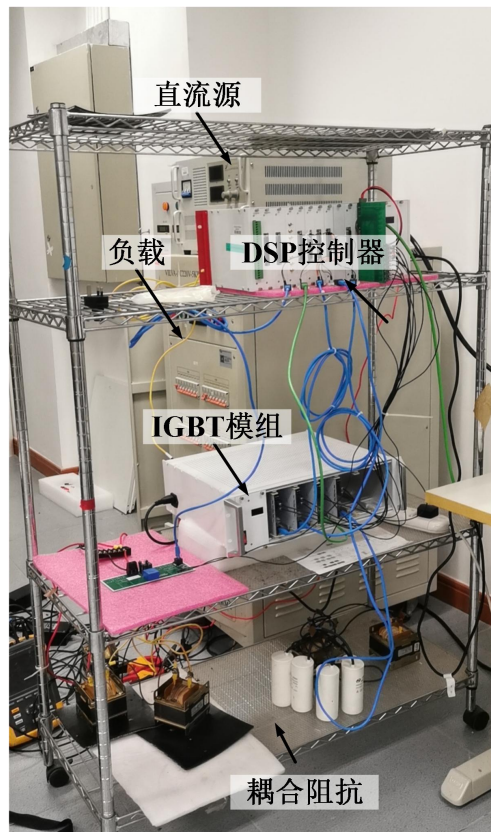


图 B4 实验平台

Fig.B4 Experimental Platform