微电网离网运行有功缺额计算方法

姚莉娜[1]，杨东海[2]，段运鑫[2]，刘宝江[2]，孙玉锋[2]

(1. 郑州轻工业学院, 河南 郑州 450002; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要：针对微电网中由于存在多种分布式电源导致其系统频率稳定控制方式比传统的配电网复杂的问题，研究快速求出微电网离网频率异常时系统内存在的有功功率缺额值的计算方法。提出了一种快捷的微电网有功功率缺额计算方法，并分析了该有功功率缺额算法对于微电网离网频率稳定控制的意义。算例分析结果表明，该方法可以指导频率稳定控制系统对孤立运行微电网内电力设备进行精确的有功功率调度，使系统频率快速恢复正常。且可以指导微电网能量管理系统进行频率稳定控制策略的仿真测试与验证。

关键词：微电网；频率稳定控制；功频响应特性；有功功率缺额；频率调节效应系数；有功调节系数

A calculation method of active power shortage in off-grid microgrid

YAO Lina[1], YANG Donghai[2], DUAN Yunxin[2], LIU Baojiang[2], SUN Yufeng[2]

(1. Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
2. Xuji Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: Based on the fact that the system frequency control method in micro grid is much difficult than the situation in traditional distribution power grid as the micro grid contains a variety of DERs, this paper researches on the control method to know how much the shortage gap of the active power storage in the abnormal frequency state during the off-grid operation of the micro grid system. A fast calculation method of the active power vacancy is proposed and the meaning of this method for the off-grid micro grid frequency stability is analyzed. Numerical example result shows that, this method for the active power vacancy can be used not only to guide the frequency stability control system adjusting the active power of the equipment in the off-grid micro grid accurately in order to maintain the system frequency within the range of conformity, but also to guide simulation verification of the control strategy about the frequency stability of the micro grid.

Key words: micro grid; control strategy about the frequency stability; response characteristics between active power and frequency; active power shortage; load frequency coefficient; active power adjustment coefficient

中图分类号： TM619 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)15-0137-08

0 引言

在传统的配用电网中，不存在供电式的分布式电源，只存在各种类型的分布式负载，电网频率是通过投切负荷来调节的。由于配电网位于输电网的末端，所以用电终端的频率状况往往是因为负载过重而偏低。因此在用电终端需要安装若干的低频减载装置来维持电网频率处于合格值范围内。低频减载装置主要根据负载的频率响应特性来计算配电网频率偏低时系统内的有功功率缺额[1]；并根据负载的重要性等级来分批次切除一定范围的负载，从而消除输电网中的供用电不平衡现象，使系统频率恢复正常。

进入 21 世纪后，随着全球资源环境压力的不断增大、电力市场化进程的不断深入以及用户对电能可靠性和质量要求的不断提升，建设更加安全、可靠、环保、经济的电力系统已经成为全球电力行业的共同目标。智能电网是当今世界电力系统发展变革的最新动向，并被认为是 21 世纪电力系统的重大科技创新和发展趋势[2]。在配用电网环节，电网的智能化发展则主要体现在支持各种类型的分布式电源的友好接入，以及就地组建管理这些分布式电源及本地负载的微电网。因此智能配电网内的电力供应模式将发生改变，即从单一的由输电网注入单

向供电模式，向大量用电端分布式发电设备的多源多向模块化管理模式——微电网模式转变[3]。在未来智能配电网中，微电网与配电网的协调运行以及微电离网孤岛运行能力则成为提高供电可靠性的有效措施之一[4]。微电网根据其与大电网(即配电网)的联结关系，可以分为并网型微电网和独立型微电网[5]。

并网型微电网是与大电网有电气连接关系的微电网，正常情况下它主要由大电网供电，并依靠大电网来维持微电网内的频率与电压正常；当大电网出现故障时，微电网则可以离网运行，由自身的分布式发电设备供电，维持内部的重要负荷稳定运行一段时间(几小时至几天)，以自身的控制管理系统来维持其频率与电压的正常[6]。独立型微电网是与大电网没有电气连接关系(或者指绝大部分时间处于离网运行状态)的微电网，它依靠自身的分布式发电设备，能维持内部的重要负荷长时间稳定运行，其频率与电压的正常全靠自身的控制管理系统来维持。

相对于传统的配用电网，微电网则是一种新兴的事物。微电网具有一系列优点，例如它的运行方式灵活，可就地解决人们的生活与生产方面的用电问题，并且分布式电源大多为可再生的清洁能源(如光伏发电、风力发电、潮汐发电、水力发电等)，此外它在发生故障时影响范围小，等等。这些优点使得微电网成为解决边远地区、孤立海岛、负荷集中地区的人们的用电问题的首选方案。但是相对于大电网，离网(或独立)运行的微电网也有其不可避免的劣势，即发电规模小，备用电源容量低，抗冲击能力弱等特征。因此如何保证独立型微电网长时间安全稳定运行的问题成为了人们首先要解决的问题。

电网的安全稳定运行主要体现在以下几方面[7]：一是频率稳定，维持频率在 50 Hz 左右，波动幅度不超过±0.2~0.5 Hz；二是电压稳定，维持电压在额定值水平，波动幅度不超过±5%；三是电压的高次谐波含量低，维持电压波形为正弦状。频率稳定主要体现在电网的有功功率平衡上；电压稳定则主要体现在电网的无功功率平衡上。

本文专门针对微电网的频率稳定进行论述，计算了离网(或独立)运行的微电网频率异常时系统内的有功功率缺额。从而可以基于该有功功率缺额，进行精确的分布式电源出力的调节以及负荷的投切，使微电网频率维持在合格值范围内。基于该有功功率缺额值，还可以对微电网离网运行时有功功率平衡管理软件系统的控制策略进行仿真验证。

1 微电网设备的功频特性

对于以旋转电源作为功率平衡节点(即主电源节点)的微电网系统，电网的频率主要由电网系统总体的有功功率状况决定。当电网内电源的有功出力充裕，即总的电源额定有功出力大于总的负荷额定有功功率(存在有功功率盈余)时，电网系统的频率就会上升，超出额定频率值；当电网内电源的有功出力不足，即总的电源额定有功出力小于总的负荷额定有功功率(存在有功功率缺额)时，则电网系统的频率就会下降，低于额定频率值。

不同于传统的配用电网，微电网中不仅存在各种分布式负荷，还存在种类丰富的分布式发电设备和分布式储能设备。这使得微电网频率异常时有功功率缺额的计算方法远比传统配用电网中低频减载装置的有功功率缺额计算方法[8]要复杂。

微电网中一部分电源的有功出力和一部分负荷的有功负载会随着电网系统频率的变化而改变其有功功率值，另一部分电源和另一部分负荷的有功功率则不随频率的波动而变动。因此，我们将微电网中的有功功率设备按照其与频率的关系进行分类，如表 1 所示。

表 1 微电网的有功功率设备类型

Table 1 Type of active power equipments in the microgrid

类型	功频特性	功频特性参数	实际设备
旋转电源	随着频率的升高而有功功率出力值下降。	发电机单位调节功率 $K_{G\cdot}>0$	柴油发电机、小型水力发电机、小型火力发电机，等等。
电力电子电源	有功功率出力值不随频率的波动而改变。	$K_{G*}=0$	光伏发电机、小型风力发电机、微燃气轮机、各类储能设备，等等。
有功负荷	随着频率的升高而有功功率值上升。	负荷的静态频率调节效应系数 $K_{Ld*}>0$	电动机、电热器、家电设备、照明用电、工农业用电，等等。
传输设备	有功功率主要体现为网损，可以归属于有功负荷类型。	$K_{Ld*}=0$	母线、线路、变压器、断路器、刀闸，等等。

表 1 中 K_{G*} 为发电机的单位调节功率(标幺值)，也称为发电机调速系统的静态频率调节效应系数，为发电机调差系数 K_d 的倒数。对于实际的旋转电源设备，K_d 是可以整定的，一般整定为如下的数值[9]：火力发电机组 K_d= 0.03~0.05 或者 K_{G*}= 20~33.3；水力发电机组 K_d= 0.02~0.04 或者 K_{G*}= 25~50；柴

油发电机组 $K_{\mathrm{d}}=0.01\sim0.05$ 或者 $K_{\mathrm{G}*}=20\sim100$。

电力电子电源，又称为分布式电力电子逆变电源设备，包括通过逆变器接入电网的分布式发电设备(如光伏发电机组、风力发电机组等)和分布式储能设备(如锂电池储能、铅酸储能、飞轮储能、超级电容等)，它们的有功出力由电力电子设备控制装置(PCS)调节，不随电网的系统频率而变化，因此设定它们的 $K_{\mathrm{G}*}=0$。

此外，不参与一次调频的旋转电源有功功率出力由外部指令控制(作为给定 PQ 值的节点)，也不考虑它的频率响应特性，其发电出力归算到电力电子电源的有功出力中，即其 $K_{\mathrm{G}*}$ 设为 0。

表 1 中 $K_{\mathrm{Ld}*}$ 为负荷的静态频率调节效应系数，它的数值取决于负荷的性质。在实际中，一般取值为 1~3。但是对于纯电阻性负荷(如电饭锅、电热水器、电热取暖器、白炽灯、加热器等)，可设 $K_{\mathrm{Ld}*}=0$。

传输及连接设备虽然存在电感，但是由于其有功功率(即网损)在微电网系统总的有功负载中所占的比重很小，因此忽略频率波动对它们的有功功率的影响，即设它们的 $K_{\mathrm{Ld}*}=0$。

设单个旋转电源 i 的有功出力为 $P_{\mathrm{G}i}$，单个负荷 j 的有功负载为 $P_{\mathrm{L}j}$。可知 $P_{\mathrm{G}i}$ 会随着频率的升高而减小，$P_{\mathrm{L}j}$ 会随着频率的升高而增大。当频率由初始频率 $f^{(0)}$ 变为最终频率 $f^{(1)}$ 后，$P_{\mathrm{G}i}$、$P_{\mathrm{L}j}$ 的变化情况为

$$\begin{cases}\Delta f=f^{(1)}-f^{(0)}\\ P_{\mathrm{G}i}^{(1)}=P_{\mathrm{G}i}^{(0)}-K_{\mathrm{G}i}\cdot\Delta f\\ P_{\mathrm{L}j}^{(1)}=P_{\mathrm{L}j}^{(0)}+K_{\mathrm{L}j}\cdot\Delta f\end{cases}\tag{1}$$

式(1)中，$K_{\mathrm{G}i}$、$K_{\mathrm{L}j}$ 分别为旋转电源 i 的单位调节功率(有名值)和负荷 j 的静态频率调节效应系数(有名值)。设旋转电源 i 和负荷 j 在额定频率 $f^{(\mathrm{N})}$ 下的有功功率分别为 $P_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}$ 和 $P_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}$，则式(1)化为标幺制形式为

$$\begin{cases}\Delta f_*=\dfrac{\Delta f}{f^{(\mathrm{N})}}=\dfrac{f^{(1)}-f^{(0)}}{f^{(\mathrm{N})}}=f_*^{(1)}-f_*^{(0)}\\ P_{\mathrm{G}i*}^{(1)}=\dfrac{P_{\mathrm{G}i}^{(1)}}{P_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}}=\dfrac{P_{\mathrm{G}i}^{(0)}-K_{\mathrm{G}i}\cdot\Delta f}{P_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}}=P_{\mathrm{G}i*}^{(0)}-\dfrac{K_{\mathrm{G}i}\cdot\Delta f}{P_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}}\\ P_{\mathrm{L}j*}^{(1)}=\dfrac{P_{\mathrm{L}j}^{(1)}}{P_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}}=\dfrac{P_{\mathrm{L}j}^{(0)}+K_{\mathrm{L}j}\cdot\Delta f}{P_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}}=P_{\mathrm{L}j*}^{(0)}+\dfrac{K_{\mathrm{L}j}\cdot\Delta f}{P_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}}\end{cases}\tag{2}$$

由式(2)可知，令 $K_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}=\dfrac{P_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}}{f^{(\mathrm{N})}}$，$K_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}=\dfrac{P_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}}{f^{(\mathrm{N})}}$，$K_{\mathrm{G}i*}=\dfrac{K_{\mathrm{G}i}}{K_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}}$，$K_{\mathrm{L}j*}=\dfrac{K_{\mathrm{L}j}}{K_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}}$，则有

$$\begin{cases}K_{\mathrm{G}i}=K_{\mathrm{G}i*}\cdot K_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}=K_{\mathrm{G}i*}\cdot\dfrac{P_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}}{f^{(\mathrm{N})}}\\ K_{\mathrm{L}j}=K_{\mathrm{L}j*}\cdot K_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}=K_{\mathrm{L}j*}\cdot\dfrac{P_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}}{f^{(\mathrm{N})}}\end{cases}\tag{3}$$

将式(3)代入式(1)可得

$$\begin{cases}P_{\mathrm{G}i}^{(1)}=P_{\mathrm{G}i}^{(0)}-K_{\mathrm{G}i*}\cdot K_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}\cdot\Delta f\\ P_{\mathrm{L}j}^{(1)}=P_{\mathrm{L}j}^{(0)}+K_{\mathrm{L}j*}\cdot K_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}\cdot\Delta f\end{cases}\tag{4}$$

式(2)还可以化为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{G}i*}^{(1)}=P_{\mathrm{G}i*}^{(0)}-K_{\mathrm{G}i*}\cdot\Delta f_*\\ P_{\mathrm{L}j*}^{(1)}=P_{\mathrm{L}j*}^{(0)}+K_{\mathrm{L}j*}\cdot\Delta f_*\end{cases}\tag{5}$$

对于微电网系统而言，设总的旋转电源有功出力为 $P_{\mathrm{G}}=\sum_i P_{\mathrm{G}i}$，总的有功负载为 $P_{\mathrm{L}}=\sum_j P_{\mathrm{L}j}$，根据式(4)有

$$\begin{cases}\sum_i P_{\mathrm{G}i}^{(1)}=\sum_i P_{\mathrm{G}i}^{(0)}-\sum_i(K_{\mathrm{G}i*}\cdot K_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})})\cdot\Delta f\\ \sum_j P_{\mathrm{L}j}^{(1)}=\sum_j P_{\mathrm{L}j}^{(0)}+\sum_j(K_{\mathrm{L}j*}\cdot K_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})})\cdot\Delta f\end{cases}\tag{6}$$

设额定频率下微电网系统的 $P_{\mathrm{G}}^{(\mathrm{N})}=\sum_i P_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}$，$P_{\mathrm{L}}^{(\mathrm{N})}=\sum_j P_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}$，$K_{\mathrm{G}}^{(\mathrm{N})}=\dfrac{P_{\mathrm{G}}^{(\mathrm{N})}}{f^{(\mathrm{N})}}$，$K_{\mathrm{L}}^{(\mathrm{N})}=\dfrac{P_{\mathrm{L}}^{(\mathrm{N})}}{f^{(\mathrm{N})}}$，则有

$$\begin{cases}K_{\mathrm{G}*}=\dfrac{\sum_i(K_{\mathrm{G}i*}\cdot K_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})})}{K_{\mathrm{G}}^{(\mathrm{N})}}=\dfrac{\sum_i(K_{\mathrm{G}i*}\cdot P_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})})}{\sum_i P_{\mathrm{G}i}^{(\mathrm{N})}}\\ K_{\mathrm{L}*}=\dfrac{\sum_j(K_{\mathrm{L}j*}\cdot K_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})})}{K_{\mathrm{L}}^{(\mathrm{N})}}=\dfrac{\sum_j(K_{\mathrm{L}j*}\cdot P_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})})}{\sum_j P_{\mathrm{L}j}^{(\mathrm{N})}}\end{cases}\tag{7}$$

式(7)为微电网系统的发电机单位调节功率(标幺值) $K_{\mathrm{G}*}$ 和微电网系统的负荷静态频率调节效应系数(标幺值) $K_{\mathrm{L}*}$ 的计算式。

根据上述定义式，并将式(7)代入式(6)，得

$$\begin{cases}P_{\mathrm{G}}^{(1)}=P_{\mathrm{G}}^{(0)}-K_{\mathrm{G}*}\dfrac{P_{\mathrm{G}}^{(\mathrm{N})}}{f^{(\mathrm{N})}}\Delta f=P_{\mathrm{G}}^{(0)}\_K_{\mathrm{G}*}P_{\mathrm{G}}^{(\mathrm{N})}\Delta f_*\\ P_{\mathrm{L}}^{(1)}=P_{\mathrm{L}}^{(0)}+K_{\mathrm{L}*}\dfrac{P_{\mathrm{L}}^{(\mathrm{N})}}{f^{(\mathrm{N})}}\Delta f=P_{\mathrm{L}}^{(0)}+K_{\mathrm{L}*}P_{\mathrm{L}}^{(\mathrm{N})}\Delta f_*\end{cases}\tag{8}$$

以标幺制形式表示式(8)为

$$\begin{cases} P_{G*}^{(1)} = P_{G*}^{(0)} \_ K_{G*} \cdot \Delta f_* \\ P_{L*}^{(1)} = P_{L*}^{(0)} + K_{L*} \cdot \Delta f_* \end{cases} \tag{9}$$

式(8)和式(9)为频率变化后，微电网系统的总发电机有功出力和总负荷有功功率的变化情况计算式。

$\Delta f_*^{(0)} = f_*^{(0)} - 1$， $\Delta f_*^{(1)} = f_*^{(1)} - 1$，由式(2)可知 $\Delta f_* = \Delta f_*^{(1)} - \Delta f_*^{(0)}$。当初始频率 $f^{(0)} = f^{(N)}$ 时，则根据式(8)可得

$$\begin{cases} P_G^{(1)} = P_G^{(N)}\left(1 - K_{G*}\Delta f_*^{(1)}\right) \Rightarrow P_G^{(N)} = \dfrac{P_G^{(1)}}{1 - K_{G*}\Delta f_*^{(1)}} \\ P_L^{(1)} = P_L^{(N)}\left(1 + K_{L*}\Delta f_*^{(1)}\right) \Rightarrow P_L^{(N)} = \dfrac{P_L^{(1)}}{1 + K_{L*}\Delta f_*^{(1)}} \end{cases} \tag{10}$$

式(10)提供了微电网系统的总发电机有功出力、总负荷有功功率的当前值与额定值的换算关系。将式(10)代入式(8)，约掉 $P_G^{(N)}$、$P_L^{(N)}$，可得

$$\begin{cases} P_G^{(1)} = \dfrac{1 - K_{G*}\Delta f_*^{(1)}}{1 - K_{G*}\Delta f_*^{(0)}} P_G^{(0)} \\ P_L^{(1)} = \dfrac{1 + K_{L*}\Delta f_*^{(1)}}{1 + K_{L*}\Delta f_*^{(0)}} P_L^{(0)} \end{cases} \tag{11}$$

式(11)提供了频率变化后微电网系统的总发电有功出力、总负荷有功功率的新值与旧值的换算关系。

2 频率异常时有功缺额计算

当独立(或离网)运行的微电网系统中不存在旋转电源设备时，一般以分布式储能设备作为有功功率平衡的调节设备——主电源，该主电源处于 VF 运行模式；系统的频率由主电源的 PCS 控制，维持在一个稳定的合格值范围内。当独立运行微电网系统中存在旋转电源设备，且旋转电源设备参与系统的一次调频时，这些旋转电源设备就充当微电网系统的主电源，负责微电网系统的有功功率平衡和频率稳定控制。

以旋转电源设备作为主电源的独立运行微电网系统中有功功率由四部份组成：参与一次调频的旋转电源有功出力 P_G、电力电子电源有功出力 P_E、负荷有功功率 P_L、有功网损 P_s。任意稳态时刻，这四部份有功功率均满足于有功功率平衡方程式

$$P_G + P_E - P_L - P_s = 0 \tag{12}$$

式中，P_G 与 P_L 会随着系统频率的变化而改变其值。

设初始状态的频率为 $f^{(0)}$，初始状态对应的有功功率平衡方程式为

$$P_G^{(0)} + P_E - P_L^{(0)} - P_s = 0 \tag{13}$$

由式(13)可以求得微电网系统的有功网损为

$$P_s = P_G^{(0)} + P_E - P_L^{(0)} \tag{14}$$

当频率变为 $f^{(1)}$ 时，P_G 与 P_L 会随着频率的变化而改变，使得原有的有功功率平衡方程式被打破，因而电网系统存在有功功率缺额：

$$PA^{(1)} = P_G^{(1)} + P_E - P_L^{(1)} - P_s \neq 0 \tag{15}$$

其中，*PA* 称为旋转电源设备的加速功率[10]。

实际上，微电网系统在任意的稳定频率状况下有功功率总是平衡的。系统频率异常反映的是额定频率下有功功率不平衡的状况。额定频率下如果发电有功功率小于负荷有功功率，则系统存在有功功率缺额，$PA^{(0)}<0$，发电机组减速，使得频率下降，从而发电有功出力增大，负荷有功功率减少，在一个较低的频率下使有功功率平衡方程式得到满足，反映给外界的信息是频率低于额定值；反之，额定频率下如果发电有功功率大于负荷有功功率，则系统存在有功功率盈余，$PA^{(0)}>0$，发电机组加速，使得频率上升，从而发电有功出力减少，负荷有功功率增大，在一个较高的频率下有功功率平衡方程式得到满足，反映给外界的信息是频率高于额定值。

所以，当频率偏低时，表示电网系统存在有功功率缺额，此时需要增加发电机有功出力，或者减少负荷有功功率，使得系统在额定频率下发用电有功功率处于平衡状态；当频率偏高时，表示电网系统存在有功功率盈余，此时需要减少发电机有功出力，或者增加负荷有功功率，使得系统在额定频率下发用电有功功率处于平衡状态。

在微电网中，可调整的有功功率包括：旋转电源出力 P_G、电力电子电源功率 P_E、负荷功率 P_L。针对不同类型的有功功率，存在不同的有功功率缺额计算值。

假设系统频率偏低，$f^{(0)} < f^{(N)}$，电网系统存在有功功率缺额。

2.1 增加电力电子电源 P_E 使系统频率达到额定值 $f^{(N)}$

假设电力电子电源有功出力增加 P_{E+} 后系统频率由 $f^{(0)}$ 上升到额定值，则称 P_{E+} 为在频率 $f^{(0)}$ 状况下微电网系统增加电力电子电源出力对应的有功功率缺额。增加电力电子电源有功出力 P_{E+} 后，微电网系统的初始状态为

$$\begin{cases} PA^{(0)} = P_G^{(0)} + P_E + P_{E+} - P_L^{(0)} - P_s > 0 \\ f^{(0)} < f^{(N)} \end{cases} \tag{16}$$

当系统达到新的稳定状态后，有功功率平衡方

程式获得满足，有

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}}^{(1)} + P_{\mathrm{E}} + P_{\mathrm{E+}} - P_{\mathrm{L}}^{(1)} - P_{\mathrm{s}} = 0 \\ f^{(1)} = f^{(\mathrm{N})} \end{cases} \tag{17}$$

将式(14)代入式(17)可得

$$(P_{\mathrm{G}}^{(1)} - P_{\mathrm{G}}^{(0)}) + P_{\mathrm{E+}} - (P_{\mathrm{L}}^{(1)} - P_{\mathrm{L}}^{(0)}) = 0 \tag{18}$$

将式(11)代入式(18)，可求得

$$P_{\mathrm{E+}} = (\frac{K_{\mathrm{G}*}P_{\mathrm{G}}^{(0)}}{1 - K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(0)}} + \frac{K_{\mathrm{L}*}P_{\mathrm{L}}^{(0)}}{1 + K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(0)}})\Delta f_* = K_{\mathrm{S}}\Delta f_* \tag{19}$$

式(19)就是在频率 $f^{(0)}$ 状况下微电网系统增加电力电子电源出力对应的有功功率缺额的计算式，其中参数 K_{S} 为微电网系统的单位调节功率，它的计算公式为

$$K_{\mathrm{S}} = \frac{K_{\mathrm{G}*}P_{\mathrm{G}}^{(0)}}{1 - K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(0)}} + \frac{K_{\mathrm{L}*}P_{\mathrm{L}}^{(0)}}{1 + K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(0)}} \tag{20}$$

如果离网频率稳定控制系统的目标频率为 $f^{(1)} = f^{(\mathrm{N})}$，则有 $\Delta f_* = 1 - f_*^{(0)} = -\Delta f_*^{(0)}$，此时系统需要增加的微电网电力电子电源有功功率缺额为 $P_{\mathrm{E+}}^{(\mathrm{N})} = -K_{\mathrm{S}}\Delta f_*^{(0)}$。

如果实际上电力电子电源有功功率增量为 $P_{\mathrm{E+}}^{(\mathrm{act})} \neq P_{\mathrm{E+}}^{(\mathrm{N})}$，那么系统在新的稳定状态下的频率 $f^{(1)} \neq f^{(\mathrm{N})}$。根据式(19)可得，此时 $f^{(1)}$ 的实际值为

$$f^{(1)} = f^{(0)} + f^{(\mathrm{N})} \cdot \frac{P_{\mathrm{E+}}^{(\mathrm{act})}}{K_{\mathrm{S}}} \tag{21}$$

2.2 增加旋转电源有功出力 P_{G} 使频率达到额定值 $f^{(\mathrm{N})}$

假设旋转电源有功出力增加 $P_{\mathrm{G+}}$ 后系统频率由 $f^{(0)}$ 上升到额定值，则称 $P_{\mathrm{G+}}$ 为在频率 $f^{(0)}$ 状况下微电网系统增加旋转电源出力对应的有功功率缺额。增加旋转电源有功出力 $P_{\mathrm{G+}}$ 后，微电网系统的初始状态为

$$\begin{cases} PA^{(0)} = P_{\mathrm{G}}^{(0)} + P_{\mathrm{G+}} + P_{\mathrm{E}} - P_{\mathrm{L}}^{(0)} - P_{\mathrm{s}} > 0 \\ f^{(0)} < f^{(\mathrm{N})} \end{cases} \tag{22}$$

当系统达到新的稳定状态后，有功功率平衡方程式获得满足，有

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}}^{(1)} + P_{\mathrm{E}} - P_{\mathrm{L}}^{(1)} - P_{\mathrm{s}} = 0 \\ f^{(1)} = f^{(\mathrm{N})} \end{cases} \tag{23}$$

将式(14)代入式(23)，可得

$$(P_{\mathrm{G}}^{(1)} - P_{\mathrm{G}}^{(0)}) - (P_{\mathrm{L}}^{(1)} - P_{\mathrm{L}}^{(0)}) = 0 \tag{24}$$

由式(11)可知

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}}^{(1)} = \dfrac{1 - K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(1)}}{1 - K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(0)}}(P_{\mathrm{G}}^{(0)} + P_{\mathrm{G+}}) \\ P_{\mathrm{L}}^{(1)} = \dfrac{1 + K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(1)}}{1 + K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(0)}}P_{\mathrm{L}}^{(0)} \end{cases} \tag{25}$$

将式(25)代入式(24)，可求得

$$P_{\mathrm{G+}} = \frac{1 - K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(0)}}{1 - K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(1)}}(\frac{K_{\mathrm{G}*}P_{\mathrm{G}}^{(0)}}{1 - K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(0)}} + \frac{K_{\mathrm{L}*}P_{\mathrm{L}}^{(0)}}{1 + K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(0)}})\Delta f_* = \frac{C_{\mathrm{G}}K_{\mathrm{S}}\Delta f_*}{1 - K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(1)}} \tag{26}$$

式(26)就是在频率 $f^{(0)}$ 状况下微电网系统增加旋转电源出力对应的有功功率缺额的计算式，其中参数 C_{G} 为微电网系统的旋转电源有功功率调节系数，它与微电网系统的初始频率相关，其计算公式为

$$C_{\mathrm{G}} = 1\_K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(0)} = 1 - K_{\mathrm{G}*}(\frac{f^{(0)}}{f^{(\mathrm{N})}} - 1) \tag{27}$$

如果离网频率稳定控制系统的目标频率为 $f^{(1)} = f^{(\mathrm{N})}$，则有 $\Delta f_*^{(1)} = 0$，$\Delta f_* = -\Delta f_*^{(0)}$，此时系统需要增加的微电网旋转电源有功功率缺额为 $P_{\mathrm{G+}}^{(\mathrm{N})} = -C_{\mathrm{G}}K_{\mathrm{S}}\Delta f_*^{(0)}$。

如果实际上旋转电源有功功率增量为 $P_{\mathrm{G+}}^{(\mathrm{act})} \neq P_{\mathrm{G+}}^{(\mathrm{N})}$，那么系统在新的稳定状态下的频率 $f^{(1)} \neq f^{(\mathrm{N})}$。根据式(26)可算得，此时 $f^{(1)}$ 的实际值为

$$f^{(1)} = f^{(0)} + f^{(\mathrm{N})} \cdot \frac{C_{\mathrm{G}}P_{\mathrm{G+}}^{(\mathrm{act})}}{C_{\mathrm{G}}K_{\mathrm{S}} + K_{\mathrm{G}*}P_{\mathrm{G+}}^{(\mathrm{act})}} \tag{28}$$

2.3 减少负荷有功功率 P_{L} 使系统频率达到额定值 $f^{(\mathrm{N})}$

假设切除负荷有功功率 $P_{\mathrm{L-}}$ 后系统频率由 $f^{(0)}$ 上升到额定值，则称 $P_{\mathrm{L-}}$ 为在频率 $f^{(0)}$ 状况下微电网系统切除负荷对应的有功功率缺额。切除负荷有功功率 $P_{\mathrm{L-}}$ 后，微电网系统的初始状态为

$$\begin{cases} PA^{(0)} = P_{\mathrm{G}}^{(0)} + P_{\mathrm{E}} - (P_{\mathrm{L}}^{(0)} - P_{\mathrm{L-}}) - P_{\mathrm{s}} > 0 \\ f^{(0)} < f^{(\mathrm{N})} \end{cases} \tag{29}$$

当系统达到新的稳定状态后，有功功率平衡方程式获得满足。此时存在等式(23)和等式(24)。

由式(11)可知

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}}^{(1)} = \dfrac{1 - K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(1)}}{1 - K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(0)}}P_{\mathrm{G}}^{(0)} \\ P_{\mathrm{L}}^{(1)} = \dfrac{1 + K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(1)}}{1 + K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(0)}}(P_{\mathrm{L}}^{(0)} - P_{\mathrm{L-}}) \end{cases} \tag{30}$$

将式(30)代入式(24)，可求得

$$P_{\mathrm{L}-}=\frac{1+K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(0)}}{1+K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(1)}}\left(\frac{K_{\mathrm{G}*}P_{\mathrm{G}}^{(0)}}{1-K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(0)}}+\frac{K_{\mathrm{L}*}P_{\mathrm{L}}^{(0)}}{1+K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(0)}}\right)\Delta f_*=\frac{C_{\mathrm{L}}K_{\mathrm{S}}\Delta f_*}{1+K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(1)}} \tag{31}$$

式(31)就是在频率 $f^{(0)}$ 状况下微电网系统切除负荷对应的有功功率缺额的计算式，其中参数 C_{L} 为微电网系统的负荷有功功率调节系数，它与微电网系统的初始频率相关，其计算公式为

$$C_{\mathrm{L}}=1+K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(0)}=1+K_{\mathrm{L}*}\left(\frac{f^{(0)}}{f^{(\mathrm{N})}}-1\right) \tag{32}$$

如果离网频率稳定控制系统的目标频率为 $f^{(1)}=f^{(\mathrm{N})}$，则有 $\Delta f_*^{(1)}=0$，$\Delta f_*=-\Delta f_*^{(0)}$，此时系统需要切除的微电网负荷对应的有功功率缺额为 $P_{\mathrm{L}-}^{(\mathrm{N})}=-C_{\mathrm{L}}K_{\mathrm{S}}\Delta f_*^{(0)}$。

如果实际上切除的负荷有功功率为 $P_{\mathrm{L}-}^{(\mathrm{act})}\neq P_{\mathrm{L}-}^{(\mathrm{N})}$，那么系统在新的稳定状态下的频率 $f^{(1)}\neq f^{(\mathrm{N})}$。根据式(31)可算得，此时 $f^{(1)}$ 的实际值为

$$f^{(1)}=f^{(0)}+f^{(\mathrm{N})}\cdot\frac{C_{\mathrm{L}}P_{\mathrm{L}-}^{(\mathrm{act})}}{C_{\mathrm{L}}K_{\mathrm{S}}-K_{\mathrm{L}*}P_{\mathrm{L}-}^{(\mathrm{act})}} \tag{33}$$

2.4 微电网系统的三类有功功率缺额的关系

由式(19)、式(26)、式(31)可知，同一个微电网在同样的初始频率状况下，系统内三类有功设备的有功功率缺额计算值满足于以下的关系式：

$$\begin{cases}P_{\mathrm{G}+}=\dfrac{C_{\mathrm{G}}}{1-K_{\mathrm{G}*}\Delta f_*^{(1)}}\cdot P_{\mathrm{E}+}\\ P_{\mathrm{L}-}=\dfrac{C_{\mathrm{L}}}{1+K_{\mathrm{L}*}\Delta f_*^{(1)}}\cdot P_{\mathrm{E}+}\end{cases} \tag{34}$$

当目标频率为额定频率时，即 $\Delta f_*^{(1)}=0$，则式(34)简化为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{G}+}=C_{\mathrm{G}}P_{\mathrm{E}+}\\ P_{\mathrm{L}-}=C_{\mathrm{L}}P_{\mathrm{E}+}\end{cases} \tag{35}$$

由于电力电子电源有功出力增量 $P_{\mathrm{E}+}$ 不随频率波动而改变其值，所以它代表了额定频率下的各类有功设备的有功功率缺额值。即对于投入旋转发电设备来说，投入的有功功率 $P_{\mathrm{G}i+}^{(\mathrm{N})}=P_{\mathrm{E}+}$；对于切除有功负载来说，切除的负荷功率 $P_{\mathrm{L}j-}^{(\mathrm{N})}=P_{\mathrm{E}+}$。根据式(4)，可以将各类有功设备的有功功率额定值换算为初始频率 $f^{(0)}$ 下的功率值。因此，若针对具体的单个旋转发电设备或单个有功负载进行控制，当目标频率为额定频率 $f^{(\mathrm{N})}$ 时，有功功率调节量为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{G}i+}^{(0)}=P_{\mathrm{E}+}(1-K_{\mathrm{G}i*}\Delta f_*^{(0)})\\ P_{\mathrm{L}j-}^{(0)}=P_{\mathrm{E}+}(1+K_{\mathrm{L}j*}\Delta f_*^{(0)})\end{cases} \tag{36}$$

如果系统频率偏高，$f^{(0)}>f^{(\mathrm{N})}$，那么电网系统存在有功功率盈余，且上述分析的结论仍然成立，只是计算出来的微电网系统各类有功设备的有功功率缺额为负值。

3 有功功率缺额值的应用

以旋转电源设备作为主电源的独立(或离网)运行微电网系统的有功功率缺额计算值，对于微电网的频率稳定自动控制软件系统具有重大的作用。

首先，微电网离网运行频率异常时有功功率缺额计算值可以用于指导微电网的频率稳定自动控制系统制订控制策略[11]。当微电网频率偏低时，表示系统中存在有功功率缺额，此时的频率稳定控制手段有：增加储能装置的放电有功功率，投入分布式发电机，增加可调节的分布式发电机的有功出力，切除有功负荷等。当微电网频率偏高时，表示系统中存在有功功率盈余，此时的频率稳定控制手段有：增加储能装置的充电有功功率，切除分布式发电机，减少可调节的分布式发电机的有功出力，投入有功负荷等[12]。有功功率缺额计算值可以指导频率稳定自动控制系统对这些有功功率设备进行精确的定量调节。

由于针对不同种类的有功设备需要不同的有功功率缺额计算公式，而同时计算三类设备的有功功率缺额值将使计算过程复杂化；所以实际应用中，可以利用式(19)只计算出增加电力电子电源出力对应的有功功率缺额值 $P_{\mathrm{E}+}$。频率稳定自动控制软件系统如果需要通过投切旋转电源或者投切有功负荷来使频率达到合格值范围内，则采用式(36)来将 $P_{\mathrm{E}+}$ 值转化为初始频率 $f^{(0)}$ 下投切具体的旋转电源对应的有功功率值 $P_{\mathrm{G}i+}^{(0)}$，或转化为频率 $f^{(0)}$ 下投切具体的有功负荷对应的有功功率值 $P_{\mathrm{L}j-}^{(0)}$，再去操作实际的有功功率设备[13]。

其次，微电网离网运行频率异常时计算的有功功率缺额值，可以用于进行微电网的频率稳定控制策略的仿真验证。当软件对具体的有功功率设备进行仿真控制操作后，如果实际调节的有功功率值不等于计算的有功功率缺额值，那么微电网的离网运行频率可能会处于合格值范围内，但是不会稳定在额定值[14]。此时可以通过式(21)、式(28)、式(33)来计算出控制操作后微电网实际应该达到的离网运行频率值 $f^{(1)}$，并由微电网离网运行的仿真控制

软件将系统频率设为计算的实际频率值，用来展现微电网的频率稳定控制策略动作后微电网系统所处的频率状态，并作为仿真控制软件生成后续控制策略的依据。

4　有功缺额计算示例

某光储柴微电网系统的K_{G*}=50，K_{L*}=1.5，额定频率为 50.0 Hz，合格频率范围为 49.5~50.2 Hz，当前频率为 50.3 Hz，柴油发动机总有功出力为 160 kW，分布式光伏总有功出力为 260 kW，负荷总有功功率为 400 kW。为了使系统频率恢复到合格频率，该投入多少负荷有功功率？

首先，计算微电网系统的单位调节功率：

$$\Delta f_*^{(0)} = f_*^{(0)} - 1.0 = \frac{50.3}{50.0} - 1.0 = 0.006$$

$$P_{G*}^{(0)} = 1 - K_{G*}\Delta f_*^{(0)} = 1 - 50 \times 0.006 = 0.8$$

$$P_{L*}^{(0)} = 1 + K_{L*}\Delta f_*^{(0)} = 1 + 1.5 \times 0.006 = 1.009$$

$$K_S = \frac{K_{G*}P_G^{(0)}}{P_{G*}^{(0)}} + \frac{K_{L*}P_L^{(0)}}{P_{L*}^{(0)}} = 10\ 594.65$$

其次，求微电网系统从当前频率调整到合格频率上限时需切除负荷的额定有功功率值：

$$\Delta f_*^{(h)} = f_*^{(h)} - 1.0 = \frac{50.2}{50.0} - 1.0 = 0.004$$

$$\Delta f_*^{(h,0)} = \Delta f_*^{(h)} - \Delta f_*^{(0)} = 0.004 - 0.01 = -0.006$$

$$P_{E+}^{(h)} = K_S \Delta f_*^{(h,0)} = 10594.65 \times (-0.006) = -63.57(\text{kW})$$

$$P_{L*}^{(h)} = 1 + K_{L*}\Delta f_*^{(h)} = 1 + 1.5 \times 0.004 = 1.006$$

$$P_{L-}^{(N,h)} = \frac{1}{P_{L*}^{(h)}} P_{E+}^{(h)} = \frac{-63.57}{1.006} = -63.19(\text{kW})$$

然后，求从当前频率调整到合格频率下限时需切除负荷的额定有功功率值：

$$\Delta f_*^{(l)} = f_*^{(l)} - 1.0 = \frac{49.5}{50.0} - 1.0 = -0.01$$

$$\Delta f_*^{(l,0)} = \Delta f_*^{(l)} - \Delta f_*^{(0)} = -0.01 - 0.01 = -0.02$$

$$P_{E+}^{(l)} = K_M \Delta f_*^{(l,0)} = 10594.65 \times (-0.02) = -211.89(\text{kW})$$

$$P_{L*}^{(l)} = 1 + K_{L*}\Delta f_*^{(l)} = 1 + 1.5 \times (-0.01) = 0.985$$

$$P_{L-}^{(N,l)} = \frac{1}{P_{L*}^{(l)}} P_{E+}^{(l)} = \frac{-211.89}{0.985} = -215.12(\text{kW})$$

需切除负荷的额定有功功率值为负值，表示需要投入有功负荷。

最后，根据上述计算可得知：为了使微网系统频率恢复到合格值，应该投入负荷的有功功率范围为 63.57~ 215.12 kW。

5　结论

本文首先论述了独立(或离网)运行微电网的一次设备的有功功率与频率的响应特性；然后基于这个功频响应特性，依据“微电网系统在任意的稳定频率状况下有功功率总是平衡的”原理，论述了频率异常情况下，微电网各类有功设备的有功功率缺额值的计算方法。

独立(或离网)运行微电网的有功功率缺额计算方法，不仅可以指导微电网的频率稳定自动控制系统进行精确的频率稳定控制策略下发，而且可以用于指导微电网的频率稳定控制策略的仿真验证，从而验证并完善微电网的频率稳定控制管理系统的控制策略。

基于本文的有功功率缺额算法而设计的、对微电网系统离网运行进行频率稳定控制的应用软件，已经在多个独立海岛微电网项目中应用，经受了现场实际运行考验，验证了本文所提有功功率缺额算法的正确性以及相应控制策略的可行性。

参考文献

[1] 张健铭, 毕天姝, 刘辉, 等. 孤岛运行与频率稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 149-152.
ZHANG Jianming, BI Tianshu, LIU Hui, et al. Review of frequency stability for islanded power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 149-152.

[2] 帅军庆. 加快发展智能电网[EB/OL]. http://news.bjx.com.cn/html/20080124/99198.shtml.
SHUAI Junqing. Accelerate the development of smart grid[EB/OL]. http://news.bjx.com.cn/html/20080124/99198.shtml.

[3] 李斌, 薄志谦. 面向智能电网的保护控制系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 7-12.
LI Bin, BO Zhiqian. Investigation on protection and control of smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 7-12.

[4] 李斌, 薄志谦. 智能配电网保护控制系统的设计与研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊): 1-6.
LI Bin, BO Zhiqian. Design and research on protection and control of smart distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S): 1-6.

[5] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of micro grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.

[6] 杨志淳, 乐健, 刘开培. 微电网并网标准研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 66-72.
YANG Zhichun, LE Jian, LIU Kaipei. Study on the standard of the grid-connected microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 66-72.

[7] 陈衍. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

[8] 林湘宁, 李正天, 薄志谦, 等. 适用于微网孤岛运行的低频减载方法[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 16-20.
LIN Xiangning, LI Zhengtian, BO Zhiqian, et al. An under-frequency load shedding method adaptive to the islanding operation of micro-grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 16-20.

[9] 陈衍. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

[10] RAMANATHAN R, RAMCHANDANI H, SACKETT S A. Dynamic load flow technique for power system simulators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 1(3): 25-30.

[11] 张洋, 王伟, 李献伟. 基于有功缺额的微电网集中控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制. 2011, 39(23): 106-111.
ZHANG Yang, WANG Wei, LI Xianwei. Research on micro-grid centralized control strategy based on active power vacancy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 106-111.

[12] 田兵, 毛承雄, 陆继明, 等. 微网储能变换器并网/离网无缝切换策略仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11): 1-7.
TIAN Bing, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Control strategy simulation of grid-connected/grid-disconnected seamless transfer of energy storage converter in microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(11): 1-7.

[13] 许守平, 侯朝勇, 王坤洋, 等. 分层控制在微网中的应用研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6): 39-45.
XU Shouping, HOU Chaoyong, WANG Kunyang, et al. Application research of hierarchical control in microgrid [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 39-45.

[14] 武星, 殷晓刚, 宋昕, 等. 中国微电网技术研究及其应用现状[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 142-149.
WU Xing, YIN Xiaogang, SONG Xin, et al. Research on microgrid and its application in China[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 142-149.

收稿日期：2014-04-17； 修回日期：2015-04-17

作者简介：

姚莉娜(1979-)，女，硕士研究生，讲师，研究方向为电气工程及信息化技术；E-mail: 765886105@qq.com

杨东海(1973-)，男，本科，研究方向为电气工程及信息化技术；

段运鑫(1978-)，男，本科，研究方向为电气工程及信息化技术。

(编辑 葛艳娜)