

# 基于潮流计算的环形直流微电网动态负荷 精确分配控制方法

李玉梅<sup>1</sup>, 查晓明<sup>2</sup>, 孙盼<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**针对跨度比较大的采用环形网络结构的直流微电网, 首先推导了采用下垂控制时环形直流微电网的潮流计算方法; 基于此, 对比分析了以下垂系数比和参考电压差值为控制量的动态负荷分配控制方法; 进一步地, 提出了综合实现动态负荷分配精确控制和负荷端电压跌落补偿的改进下垂控制方法; 最后, 搭建了四端环形直流微电网的半实物实时仿真实验平台, 实验结果验证了所提控制方法的有效性。

**关键词:**直流微电网; 环形网络; 下垂控制; 潮流计算; 动态负荷分配; 电压跌落补偿

**中图分类号:** TM 727

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202003009

## 0 引言

下垂控制具有易于实现、无需通信、即插即用和可靠性高的优点, 含有综合能源系统的直流微电网的母线电压控制中常采用下垂控制方法来解决功率分配问题。但在跨度比较大的环形直流微电网中, 网络阻抗不可忽略, 采用下垂控制的变换器的负荷分配比不仅受下垂控制参数、网络阻抗和网络结构的影响, 而且会随着负荷功率和可再生能源发电功率的变化而变化。

目前, 针对线路阻抗引起的下垂控制中负荷分配不精确的问题, 主要是通过改变下垂系数来提高负荷平均分配精度。文献[1-2]采用分段变化的下垂系数, 轻载时采用较小的下垂系数, 重载时采用较大的下垂系数以提高负荷分配精度。文献[3]根据负载大小连续调节下垂系数。上述文献均在重载时通过增大下垂系数来提高均流精度, 此方法在一定程度上可以提高均流精度, 降低母线电压波动, 但增大下垂系数会降低系统的稳定性, 系统在轻载、重载状态切换时, 下垂系数变化较大, 容易引发振荡。文献[4]通过引入电压变化率代替电压在下垂控制中的地位, 减少电压电流间的影响, 使电流负荷分配精度得以改善。文献[5-7]采用分层控制思想, 在上层控制器中根据各变换器输出电流的大小及控制目标对下垂系数和下垂参考电压进行二次校正。而文献[8-20]采用自适应下垂技术, 通过引入各变换器输出电流和负荷端电压负反馈, 实时调节下垂系数和下垂电压参考值的大小, 以满足负荷动态变化和可再生能源发电随机性下的负荷精确分配和负荷端电压的补偿要求, 但由于额外增加了一层控制器, 增加

了直流微电网控制系统的复杂性, 降低了动态性能。

对于包含多种发电类型的直流微电网, 变换器的类型和容量也不尽相同, 各变换器之间的负荷功率分配是直流微电网潮流控制的体现, 下垂控制参数的变化会改变潮流分布。本文通过建立含参数的潮流计算方程进行连续潮流计算, 得到下垂控制参数与负荷功率分配和负荷端电压之间的关系, 进而得到同时实现动态负荷分配控制和负荷端电压跌落补偿控制的改进下垂控制方法。并且针对潮流计算中网络阻抗计算误差引起的负荷分配偏差较大的情况, 提出一种自适应下垂控制方法。

## 1 采用下垂控制时环形直流微电网潮流计算方法

通常直流微电网分布式能源变换器的工作模式不止一种, 节点的性质取决于其工作模式, 如光伏和风电工作于最大功率点跟踪(MPPT)模式时为功率节点(P节点), 而工作于恒压控制时为电压节点(V节点); 蓄电池、超级电容等储能装置的双向DC/DC变换器工作于充电状态时为P节点, 工作于下垂控制时, 既不是功率恒定, 又不是电压恒定, 将其定义为VD节点; 与交流大电网互联的双向AC/DC变换器工作于下垂控制时为VD节点, 工作于限流模式时为P节点。对端电压要求比较严格的负荷端或其他直流微电网组网时的出口端也可以看作V节点。因此直流微电网系统中的节点一般分为以下3种:P节点、VD节点和V节点。

### 1.1 环形直流微电网潮流计算方法

假设某直流微电网的节点数为 $n$ , 某工作模式下VD节点的个数为 $m$ , P节点的个数为 $n-m-1$ , V节点的个数为1, 当负荷节点电压跌落需要补偿时, 负荷节点既可以看作为P节点也可以看作为V节点, 各节点已知的物理量为:

收稿日期: 2019-07-25; 修回日期: 2020-02-13

基金项目: 湖北省自然科学基金重点项目(2018CFA008)

Project supported by the Key Natural Science Foundation of Hubei Province(2018CFA008)

$$F = \left\{ \underbrace{U_{01}^{\text{ref}}, U_{02}^{\text{ref}}, \dots, U_{0m}^{\text{ref}}}_{\text{VD节点}}, \underbrace{P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_{n-1}}_{\text{P节点}}, \underbrace{U_n^{\text{ref}}}_{\text{V节点}} \right\} \quad (1)$$

其中,  $U_{01}^{\text{ref}}, U_{02}^{\text{ref}}, \dots, U_{0m}^{\text{ref}}$  为VD节点的电压参考值;  $P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_{n-1}$  为P节点的功率参考值;  $U_n^{\text{ref}}$  为V节点的电压参考值。

对于采用电压下垂控制的VD节点有:

$$U_i^{\text{ref}} = U_0^{\text{ref}} - k_d I_{dc} \quad (2)$$

其中,  $U_i^{\text{ref}}$  为下垂控制变换器输出电压的参考值;  $U_0^{\text{ref}}$  为变换器空载时电压的参考值;  $k_d$  为下垂系数;  $I_{dc}$  为变换器输出电流值。

因此对于采用电压下垂控制的变换器节点, 需要满足:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_j Y_{ij} U_j \\ U_i = U_{0i}^{\text{ref}} - k_{id} I_{dci} \\ I_{dci} = \frac{P_i}{U_i} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $P_i$  和  $U_i$  分别为节点  $i$  的注入功率和电压;  $U_j$  为节点  $j$  的电压;  $Y_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  的互导纳, 当  $i=j$  时为节点  $i$  的自导纳。

对于  $m$  个VD节点, 其潮流方程为:

$$\begin{cases} U_{01}^{\text{ref}} = U_1 + k_{1d} \sum_{j=1}^n Y_{1j} U_j \\ U_{02}^{\text{ref}} = U_2 + k_{2d} \sum_{j=1}^n Y_{2j} U_j \\ \vdots \\ U_{0m}^{\text{ref}} = U_m + k_{md} \sum_{j=1}^n Y_{mj} U_j \end{cases} \quad (4)$$

对于  $n-m-1$  个P节点, 其潮流方程为:

$$\begin{cases} P_{m+1} = U_{m+1} \sum_{j=1}^n Y_{(m+1)j} U_j \\ P_{m+2} = U_{m+2} \sum_{j=1}^n Y_{(m+2)j} U_j \\ \vdots \\ P_{n-1} = U_{n-1} \sum_{j=1}^n Y_{(n-1)j} U_j \end{cases} \quad (5)$$

对于V节点, 其约束方程为  $U_n = U_n^{\text{ref}}$ , 其中  $U_n$  为负荷端电压实际值。

## 1.2 四端环形直流微电网潮流计算方法

图1为包含交流电网、储能系统、可再生能源和

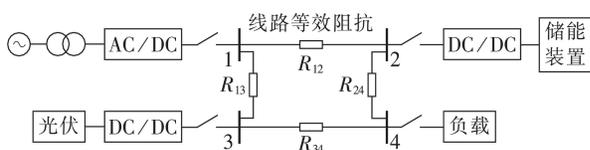


图1 四端环形直流微电网

Fig.1 Four-terminal annular DC microgrid

负荷节点的典型环形直流微电网的最小系统, 节点1为双向AC/DC变换器及交流大电网, 节点2为双向DC/DC变换器及储能装置, 节点3为DC/DC变换器及光伏电池, 节点4为恒功率负荷。假定双向AC/DC变换器和双向DC/DC变换器工作于下垂控制, 为VD节点, 下垂控制电压参考值分别为  $U_{01}^{\text{ref}}, U_{02}^{\text{ref}}$ , 下垂系数分别为  $k_{1d}, k_{2d}$ ; 光伏DC/DC变换器工作于MPPT模式, 为P节点, 功率为  $P_3$ ; 负荷节点为P节点, 功率为  $P_4$ 。

根据式(4)和式(5)列写潮流方程为:

$$\begin{cases} U_{01}^{\text{ref}} = k_{1d} \left[ \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} \right) U_1 - \frac{U_2}{R_{12}} - \frac{U_3}{R_{13}} \right] + U_1 \\ U_{02}^{\text{ref}} = k_{2d} \left[ \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{24}} \right) U_2 - \frac{U_1}{R_{12}} - \frac{U_4}{R_{24}} \right] + U_2 \\ P_3 = U_3 \left[ \left( \frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{34}} \right) U_3 - \frac{U_1}{R_{13}} - \frac{U_4}{R_{34}} \right] \\ P_4 = -U_4 \left[ \left( \frac{1}{R_{24}} + \frac{1}{R_{34}} \right) U_4 - \frac{U_2}{R_{24}} - \frac{U_3}{R_{34}} \right] \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中的未知量为  $U_1 \sim U_4$ 。假设  $U_{01}^{\text{ref}} = U_{02}^{\text{ref}} = 520 \text{ V}$ ,  $k_{1d} = k_{2d} = 0.5$ ,  $P_3 = 5 \text{ kW}$ ,  $P_4 = 10 \text{ kW}$ ,  $R_{12} = 1 \Omega$ ,  $R_{13} = 0.5 \Omega$ ,  $R_{24} = 0.4 \Omega$ ,  $R_{34} = 0.3 \Omega$  时, 计算图1所示的环形直流网络潮流, 各下垂控制参数保持不变, 当负荷功率和光伏发电功率发生变化时, 负荷分配比变化曲线如图2所示。可见负荷分配比随着负荷功率和光伏发电功率的变化而变化, 在某些情况下还会出现负荷分配比为负值的情况, 表明此时有1个变换器功率流向发生变化, 如果是节点1功率流向发生变化则表明此时蓄电池通过DC/DC变换器向直流微电网注入功率, 同时直流微电网通过双向AC/DC变换器向交流大电网注入功率, 这种工作模式通常是不允许的。可再生能源如光伏和风电系统的发电功率受天气影响较大, 具有较大的随机性, 而负荷功率也是波动的, 因此为了保持恒定的负荷分配比, 必须根据负荷实时功率和再生能源的实时发电功率来调整下垂控制参数的大小。

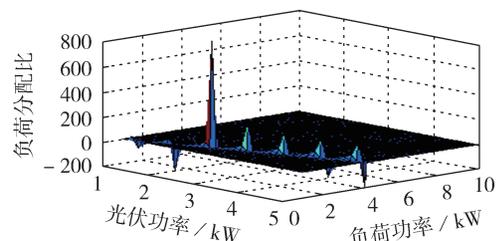


图2 负荷分配比变化曲线

Fig.2 Curve of variation of load allocation ratio

## 2 基于潮流计算的下垂控制改进方法

直流微电网在运行过程中, 负荷功率的合理分

配取决于各分布式电源接口变换器的并网容量、各分布式能源的实时发电容量以及能量管理需求,因此需要对各变换器间的负荷分配比进行精确控制。由1.2节的环形直流微电网的潮流计算方法分析可知,当负荷功率或光伏发电功率发生变化时会导致下垂控制变换器负荷分配比发生变化,由于可再生能源的分布式发电具有间歇性和随机性的特点,这使得负荷功率的分配控制更加复杂。

### 2.1 基于变下垂系数比的动态负荷分配控制方法

设置变换器 $i$ 的下垂系数 $k_{di} = \alpha_i k_d (i \in [1, m])$ ;设置变换器负荷分配比的期望值为 $\beta_1: \beta_2: \dots: \beta_m$ ,令 $\alpha_1 = 1, \alpha_i (i \in (1, m])$ 为待求量,共计 $m - 1$ 个。当列写潮流方程时,增加了 $m - 1$ 个未知量,需要增加 $m - 1$ 个变换器的负荷功率分配比约束方程为:

$$\begin{cases} \beta_2 U_1 \sum_j Y_{1j} U_j = \beta_1 U_2 \sum_j Y_{2j} U_j \\ \vdots \\ \beta_m U_1 \sum_j Y_{1j} U_j = \beta_1 U_m \sum_j Y_{mj} U_j \end{cases} \quad (7)$$

式(7)、式(4)和式(5)共同组成了环形直流微电网的含 $m - 1$ 个参数的潮流计算方程组。

以图1所示的四端环形直流微电网为例,假设2个变换器的负荷分配比的期望值为 $\beta$ ,已知变换器1的下垂系数为 $k_d$ ,则变换器2的下垂系数为 $\alpha_2 k_d$ ,其中 $\alpha_2$ 为待求量。这对于式(6)所示的潮流计算方程组则多了1个未知量 $\alpha_2$ ,需要另外补充负荷分配比约束方程,节点3、4的潮流计算方程不变,节点1、2含参数 $\alpha_2$ 的潮流计算方程和约束方程如式(8)所示。

$$\begin{cases} U_{01}^{\text{ref}} = k_d \left[ \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} \right) U_1 - \frac{U_2}{R_{12}} - \frac{U_3}{R_{13}} \right] + U_1 \\ U_{02}^{\text{ref}} = \alpha_2 k_d \left[ \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{24}} \right) U_2 - \frac{U_1}{R_{12}} - \frac{U_4}{R_{24}} \right] + U_2 \\ \left[ \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} \right) U_1 - \frac{U_2}{R_{12}} - \frac{U_3}{R_{13}} \right] U_1 = \\ \beta \left[ \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{24}} \right) U_2 - \frac{U_1}{R_{12}} - \frac{U_4}{R_{24}} \right] U_2 \end{cases} \quad (8)$$

令式(8)中 $k_d = 0.5$ 、负荷分配比期望值 $\beta = 2$ ,其他参数不变,当负荷功率 $P_4$ 和光伏发电功率 $P_3$ 变化时,下垂系数比 $\alpha_2$ 的变化曲线如图3所示。可见下垂系数随 $P_3$ 、 $P_4$ 呈非线性变化,特别是当负荷功率与光伏发电功率接近时,下垂系数变化剧烈,出现为负值的情况。

### 2.2 基于变参考电压差值的动态负荷分配控制方法

由于参考电压发生变化也会导致负荷分配比发生变化,故可以以下垂控制参考电压为控制量来实现动态负荷分配控制。设下垂控制变换器1的参考

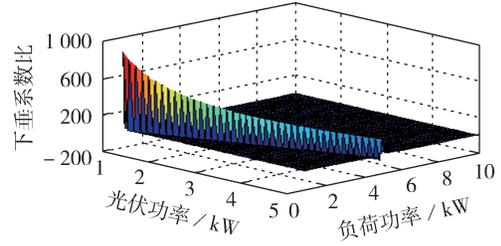


图3 下垂系数比 $\alpha_2$ 变化曲线

Fig.3 Curve of variation of  $\alpha_2$

电压为 $U_{01}^{\text{ref}}$ 、变换器2的参考电压为 $U_{01}^{\text{ref}} - U_{d2}$ ,依此类推,变换器 $m$ 的参考电压为 $U_{01}^{\text{ref}} - U_{dm}$ ,其中增加了 $m - 1$ 个未知量 $U_{d2}, U_{d3}, \dots, U_{dm}$ ,仍需要增加式(7)所示的 $m - 1$ 个变换器的负荷功率分配比约束方程。以图1所示的四端环形直流微电网为例,设2个参考电压差值 $U_d$ 为参数变量,对应于式(8)中节点1、2的潮流方程为:

$$\begin{cases} U_{01}^{\text{ref}} = k_d \left[ \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} \right) U_1 - \frac{U_2}{R_{12}} - \frac{U_3}{R_{13}} \right] + U_1 \\ U_{01}^{\text{ref}} - U_d = k_d \left[ \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{24}} \right) U_2 - \frac{U_1}{R_{12}} - \frac{U_4}{R_{24}} \right] + U_2 \end{cases} \quad (9)$$

令式(9)中 $k_d = 0.5$ ,其他参数不变,参考电压差值 $U_d$ 随负荷功率和光伏发电功率变化的曲线如图4所示。由图4可以看出, $U_d$ 与负荷功率 $P_4$ 和光伏发电功率 $P_3$ 均呈线性关系,随着 $P_3$ 的增大而减小,随着 $P_4$ 的增大而增大。

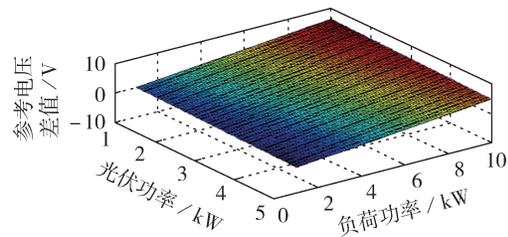


图4 参考电压差值 $U_d$ 变化曲线

Fig.4 Curve of variation of  $U_d$

### 2.3 考虑负荷电压跌落补偿的动态负荷分配控制方法

变换器输出电压随输出电流的增大而减小是传统下垂控制的固有问题,线路阻抗压降进一步加大了负荷节点电压的波动,甚至超出允许范围,因此需对负荷电压进行补偿,使其稳定在指令值是非常必要的。由2.1节和2.2节的分析结果可以看出,如果通过控制下垂系数比来进行动态负荷分配控制,在某些工况下下垂系数比会出现负值的情况,不能实现下垂控制,而且会出现下垂系数比非常大的情况,不利于系统稳定运行,而参考电压差值与负荷功率和光伏发电功率均呈线性关系,便于实现控制。为了减小对负荷功率分配的影响,可以在各VD节点

的下垂参考电压叠加1个相同的平移量 $\Delta U$ ,与式(9)相比,虽然增加了1个参数变量,但由于负荷节点可以看作V节点,节点电压已知,这样潮流方程的个数与未知量的个数仍然是相等的。综合考虑负荷分配控制和负荷端电压补偿控制的VD节点的潮流方程为:

$$\begin{cases} U_{01}^{\text{ref}} + \Delta U_1 = U_1 + k_{1d} \sum_j Y_{1j} U_j \\ U_{01}^{\text{ref}} + \Delta U_2 = U_2 + k_{2d} \sum_j Y_{2j} U_j \\ \vdots \\ U_{01}^{\text{ref}} + \Delta U_m = U_m + k_{md} \sum_j Y_{mj} U_j \\ U_n = U_n^{\text{ref}} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)与式(7)所示的负荷分配约束方程组以及式(5)所示的P节点潮流方程共同组成了环形直流微电网含参数的潮流计算方程。

对于图1所示的四端环形直流微电网,节点1、2的潮流计算方程以及负荷节点电压约束方程为:

$$\begin{cases} U_{01}^{\text{ref}} + \Delta U_1 = k_d \left[ \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} \right) U_1 - \frac{U_2}{R_{12}} - \frac{U_3}{R_{13}} \right] + U_1 \\ U_{01}^{\text{ref}} + \Delta U_2 = k_d \left[ \left( \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{24}} \right) U_2 - \frac{U_1}{R_{12}} - \frac{U_4}{R_{24}} \right] + U_2 \\ U_4^{\text{ref}} = U_4 \end{cases} \quad (11)$$

设 $U_4^{\text{ref}} = 500 \text{ V}$ ,其他参数和网络阻抗不变,由式(6)所示的节点3和节点4的潮流方程、式(8)所示的负荷分配比约束方程以及式(11)联立计算得到 $\Delta U_1 = -10.85 \text{ V}$ 、 $\Delta U_2 = -15.69 \text{ V}$ ,进一步计算得到 $P_1 = 3.38 \text{ kW}$ 、 $P_2 = 1.69 \text{ kW}$ 、 $U_4 = 500 \text{ V}$ ,满足负载电压恒定下负荷分配控制的要求。

当负荷功率和光伏发电功率变化时, $\Delta U_1$ 和 $\Delta U_2$ 的变化曲线如图5所示。可见 $\Delta U_1$ 和 $\Delta U_2$ 关于负荷功率和光伏发电功率分别呈不同斜率的线性关系, $\Delta U_1$ 和 $\Delta U_2$ 关于 $P_3$ 、 $P_4$ 的线性关系可以用式(12)表示。

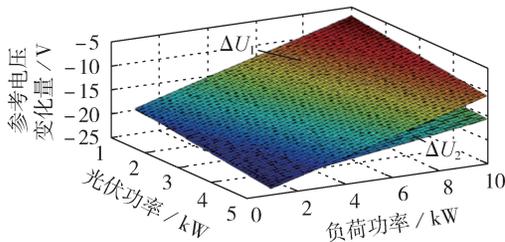


图5 各补偿电压变化量曲线

Fig.5 Curves of variation of compensation voltages

$$\begin{cases} \Delta U_1 = f_1(P_3, P_4) = k_{11} P_3 + k_{12} P_4 + b_1 \\ \Delta U_2 = f_2(P_3, P_4) = k_{21} P_3 + k_{22} P_4 + b_2 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $k_{11}$ 、 $k_{12}$ 、 $b_1$ 、 $k_{21}$ 、 $k_{22}$ 、 $b_2$ 为待定系数。各系数与直

流微电网的结构、网络阻抗和参考电压、下垂系数均有关系,可以通过离线计算环形直流微电网的连续潮流拟合出式(12)中各系数。对于本文中的四端环形网络,由图5拟合得到 $k_{11} = -1.047$ 、 $k_{12} = 1.442$ 、 $b_1 = -20.03$ 、 $k_{21} = -0.632$ 、 $k_{22} = 0.75$ 、 $b_2 = -20.032$ 。如当 $P_3 = 6.5 \text{ kW}$ 、 $P_4 = 3.7 \text{ kW}$ 时计算得到对应的 $\Delta U_1 = -14.82 \text{ V}$ 、 $\Delta U_2 = -17.65 \text{ V}$ ,由潮流计算公式得 $P_1 = 1.759 \text{ kW}$ 、 $P_2 = 0.876 \text{ kW}$ (即 $P_1/P_2 \approx 2.01$ )、 $U_3 = 499.99 \text{ V}$ ,满足控制要求。

### 3 自适应下垂控制改进方法

由式(12)计算得到的 $\Delta U_i$ ( $i = 1, 2$ )的准确性依赖于网络线路等效阻抗的测量精度和潮流计算精度,当系数误差较大时会影响负荷功率分配控制和负荷电压补偿控制的精度,可以通过引入负荷节点电压和变换器的输出电流的闭环反馈控制进行校正。针对环形直流微电网的 $m$ 个VD节点,令:

$$\begin{cases} \Delta U_v = \left( k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s} \right) (U_n^{\text{ref}} - U_n) \\ \Delta U_{ij} = \left( k_{pij} + \frac{k_{ij}}{s} \right) (I_j^{\text{ref}} - I_j) \quad j \in [1, m-1] \\ \Delta U_{im} = - \sum_{j \in [1, m-1]} \Delta U_{ij} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $k_{pv}$ 和 $k_{iv}$ 分别为负荷端电压PI控制器的比例系数和积分系数; $I_j^{\text{ref}}$ 和 $I_j$ 分别为第 $j$ 个下垂控制变换器

的输出电流指令值和实际值, $I_j^{\text{ref}} = \frac{\beta_j}{\sum_{i \in [1, m]} \beta_i} \sum I_i$ ;

$k_{pij}$ 和 $k_{ij}$ 分别为第 $j$ 个下垂控制变换器的输出电流PI控制器的比例系数和积分系数。

第 $j$ 个变换器下垂控制参考电压的变化量为:

$$\Delta U_j = f_j(P_m) + \Delta U_v + \Delta U_{ij} \quad (14)$$

其中, $f_j(P_m)$ 为如式(12)所示的通过离线连续潮流计算拟合得到的线性函数。自适应下垂控制改进方法的原理框图如图6所示。图中,PI<sub>11</sub>和PI<sub>12</sub>为电流环比例积分控制器;PI<sub>v</sub>为电压环比例积分控制器。如果可以忽略测量误差,则无需计算 $\Delta U_v$ 和 $\Delta U_{ij}$ 的大小。

### 4 实验分析

#### 4.1 测量误差忽略不计时的实验分析

利用实时仿真系统SpaceR搭建图1所示的四端环形直流微电网的半实物仿真平台,仿真参数如下: $R_{24} = 0.4 \Omega$ 、 $R_{34} = 0.3 \Omega$ ,2个下垂控制变换器的负荷功率分配比期望值 $\beta = 2$ ,负荷端电压期望为 $500 \text{ V}$ 、 $k_{pv} = 1$ 、 $k_{iv} = 0.5$ 、 $k_{pi1} = k_{pi2} = 0.5$ 、 $k_{i1} = k_{i2} = 0.2$ 。由离线潮流计算得到 $\Delta U_1$ 和 $\Delta U_2$ 关于 $P_3$ 、 $P_4$ 的线性表达式如式(15)所示。

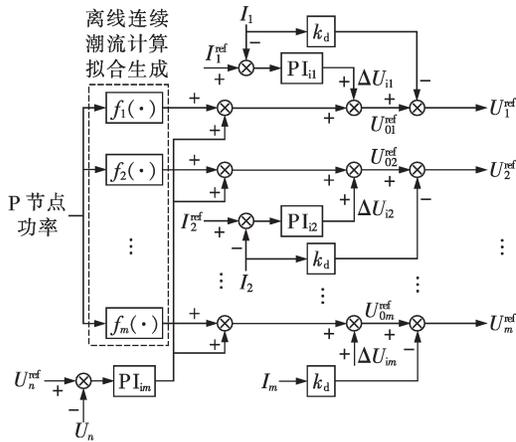


图 6 自适应下垂改进方法的原理框图

Fig.6 Block diagram of improved adaptive droop method principle

$$\begin{cases} \Delta U_1 = -1.047 P_3 + 1.442 P_4 - 20.03 \\ \Delta U_2 = -0.632 P_3 + 0.75 P_4 - 20.032 \end{cases} \quad (15)$$

[0, 10] s 采用定下垂系数的传统下垂控制方法, (10, 40] s 采用 2.3 节提出的改进下垂控制方法。表 1 给出了各时段的负荷、光伏发电功率、 $\Delta U_1$  和  $\Delta U_2$  的大小, 实验波形如图 7 所示。可见在不考虑线路阻抗和电压以及功率测量误差的情况下, 当负荷功率和光伏发电功率发生变化时, 采用 2.3 节提出的下垂控制改进方法可以有效地进行负荷功率分配控制和负荷端电压补偿控制。

#### 4.2 测量误差比较大的实验分析

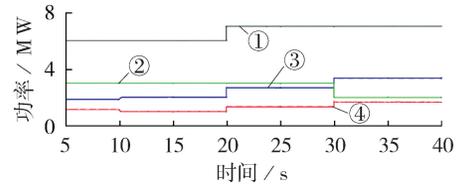
假定由于测量误差导致离线拟合得到的线性表达式的系数有误差, 则有:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = -1.21 P_3 + 1.16 P_4 - 19.015 \\ \Delta U_2 = -0.8644 P_3 + 0.45 P_4 - 20.014 \end{cases} \quad (16)$$

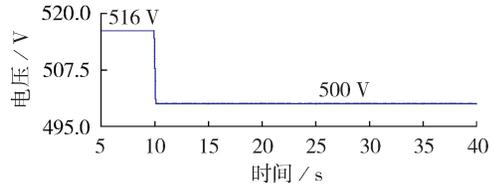
设负荷功率为 6 kW、光伏发电功率为 2.7 kW, 计算得到  $\Delta U_1 = -3.49$  V、 $\Delta U_2 = -15.06$  V。[0, 10] s 时, 采用传统的定下垂系数的下垂控制方法, 10 s 时采用 2.3 节的改进下垂控制方法, 20 s 时投入负荷端电压反馈控制, 30 s 时投入各变换器电流反馈控制, 得到实验波形如图 8 所示。可见当测量误差造成拟合的线性表达式的系数误差比较大时, 变换器输出电流和负荷端电压与指令值均有较大偏离; 当采用电压反馈和电流反馈进行电压偏差校正时, 负荷节点电压和负荷分配比均控制在指令值上。

表 1 负荷、光伏发电功率、 $\Delta U_1$  和  $\Delta U_2$  的计算结果  
Table 1 Calculative results of load, PV generation power,  $\Delta U_1$  and  $\Delta U_2$

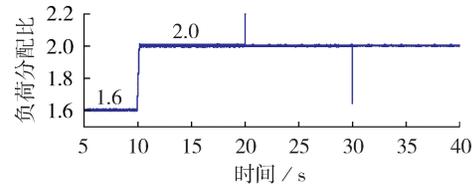
时段/s	$P_4$ /kW	$P_3$ /kW	$\Delta U_1$ /V	$\Delta U_2$ /V
[0, 10]	6	3	0	0
(10, 20]	6	3	-14.52	-17.43
(20, 30]	7	3	-13.08	-16.68
(30, 40]	7	2	-12.03	-16.05



① 负荷, ② 光伏发电功率  
③ 变换器 1 输出功率, ④ 变换器 2 输出功率  
(a) 各节点功率



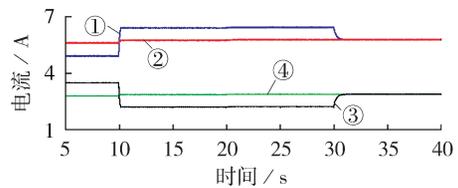
(b) 负荷端电压



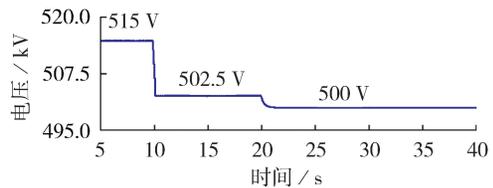
(c) 负荷分配比

图 7 忽略测量误差时的实验波形

Fig.7 Experimental waveforms without measurement errors



① 变换器 1 输出电流, ② 变换器 1 电流参考值  
③ 变换器 2 输出电流, ④ 变换器 2 电流参考值  
(a) 输出电流



(b) 负荷端电压

图 8 测量误差不可忽略时的实验波形

Fig.8 Experimental waveforms with measurement errors

## 5 结论

针对本文给出的四端环形直流微电网, 以各下垂控制参考电压变化量为控制参数, 建立满足负荷端电压补偿和动态负荷分配的含参数潮流方程, 通过离线拟合建立控制量与负荷功率和可再生能源发电功率的线性关系式, 在线运行时可以直接由函数关系式计算得到满足负荷分配比和负荷电压补偿的参考电压变化量, 从而大幅减小实时运行的计算量, 提高系统运行速度。针对网络阻抗测量误差引起的

负荷分配控制偏差和电压补偿偏差,提出了改进的自适应下垂控制方法,该方法首先通过离线连续潮流计算拟合得到各控制量与负荷功率和可再生能源发电功率的函数关系,并在此基础上引入负荷端电压反馈控制和各下垂控制变换器输出电流反馈控制以消除离线拟合中测量误差的影响。

### 参考文献:

- [1] KIM J W, CHOI H S, BO H C. A novel droop method for converter parallel operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 17(1): 25-32.
- [2] MAJUMDER R, GHOSH A, LEDWICH G, et al. Power system stability and load sharing in distributed generation[C]//Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. New Delhi, India: IEEE, 2008: 1-6.
- [3] YAO W, CHEN M, GAO M. A wireless load sharing controller to improve the performance of parallel-connected inverters[C]//2008 Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). [S.l.]: IEEE, 2008: 1628-1631.
- [4] 杨捷, 金新民, 吴学智. 一种适用于直流微电网的改进型电流负荷分配控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 59-67.  
YANG Jie, JIN Xinmin, WU Xuezhi. An improved load current sharing control method in DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 59-67.
- [5] 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 Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [6] LU X, GUERRERO J M, SUN K, et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1800-1812.
- [7] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J M. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1900-1913.
- [8] 李晓晓, 王晓兰. 基于离散分组一致性算法的双母线孤岛直流微电网自适应下垂控制[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 7-14.  
LI Xiaoxiao, WANG Xiaolan. Adaptive droop control of islanded DC microgrid with two buses based on discrete group consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 7-14.
- [9] 米阳, 吴彦伟, 纪宏澎, 等. 基于多组储能动态调节的独立直流微电网协调控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 170-176.  
MI Yang, WU Yanwei, JI Hongpeng, et al. Coordinative control based on dynamic load allocation among multiple energy storages for islanded DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 170-176.
- [10] KHORSANDI A, ASHOURLOO M, MOKHTARI H. An adaptive droop control method for low voltage DC microgrids[C]//5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference. [S.l.]: IEEE, 2014: 201-207.
- [11] DRAGICEVIC T, GUERRERO J M, VASQUEZ J C. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.
- [12] LU X N, SUN K, GUERRERO J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage system in DC microgrid application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2804-2815.
- [13] LIEGMANN E, MAUMDER R. An efficient method of multiple storage control in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3437-3444.
- [14] SALOMONSSON D, SODER L, SANNINO A. An adaptive control system for a DC microgrid for data centers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(6): 1910-1917.
- [15] HAILESELASSIE T M, UHLEN K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1441-1449.
- [16] 刘一琦, 王建勋, 傅裕, 等. 直流微电网中不同网络结构的负荷功率分配精度研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 53-59.  
LIU Yiqi, WANG Jianze, FU Yu, et al. Load power sharing accuracy for different network configurations of DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 53-59.
- [17] 米阳, 蔡杭道, 袁明瀚, 等. 直流微电网分布式储能系统电流负荷动态分配方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 17-23.  
MI Yang, CAI Hangyi, YUAN Minghan, et al. Dynamic distribution method of current load for distributed energy storage system in DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 17-23.
- [18] 朱弘祺, 李勇, 王姿雅, 等. 考虑直流电压无差调节的MMC-MTDC协调下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 196-199.  
ZHU Hongqi, LI Yong, WANG Ziya, et al. Coordinated droop control strategy considering indifference regulation of DC voltage for MMC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 196-199.
- [19] 杨文博, 宋强, 朱喆, 等. 基于直流内电势控制的MMC多端直流输电系统最优下垂控制[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 51-59.  
YANG Wenbo, SONG Qiang, ZHU Zhe, et al. Optimal droop control based on direct DC internal potential control for MMC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 51-59.
- [20] 李祥山, 杨晓东, 张有兵, 等. 含母线电压补偿和负荷功率动态分配的直流微电网协调控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 198-204.  
LI Xiangshan, YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, et al. Coordinated control of DC microgrid considering bus voltage compensation and load power dynamic sharing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 198-204.

### 作者简介:



李玉梅

李玉梅(1975—),女,山东嘉祥人,讲师,博士,主要研究方向为直流微电网协调控制及稳定性分析(E-mail:liyumei75@163.com);

查晓明(1967—),男,安徽怀宁人,教授,博士,主要研究方向为电力电子功率变换及其系统理论、智能电网及新能源发电中的电力电子技术应用(E-mail:489451440@qq.com);

孙盼(1986—),男,山东淄博人,讲师,博士,主要研究方向为岛礁综合能源系统安全运行(E-mail:489451440@qq.com)。

(编辑 李玮)

(下转第28页 continued on page 28)

1-10.

MENG Jianhui, WANG Yi, SHI Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10.

[18] 邹培根, 孟建辉, 王毅, 等. 灵活虚拟同步机主要控制参数对系统频率稳定性的影响分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1335-1342.

ZOU Peigen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Influence analysis of the main control parameters in FVSG on the frequency stability of the system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1335-1342.

#### 作者简介:

苏宏升(1969—), 男, 甘肃靖远人, 教授, 博士研究生导



苏宏升

师, 博士, 主要研究方向为风电并网控制、设备预防性维修及系统可靠性与安全性(E-mail: shsen@163.com);

江 昆(1994—), 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为分布式发电与微网建模与控制(E-mail: 634756243@qq.com);

杨 祯(1994—), 女, 甘肃临洮人, 硕士研究生, 主要研究方向为微网建模与控制(E-mail: 759530210@qq.com);

何开忠(1992—), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 主要研究方向为并网逆变器动态特性分析与稳定控制(E-mail: kaizhong\_HE@163.com)。

(编辑 李玮)

## Comprehensive control strategy of microgrid frequency and voltage based on virtual synchronous generator

SU Hongsheng<sup>1,2</sup>, JIANG Kun<sup>1,2</sup>, YANG Zhen<sup>1,2</sup>, HE Kaizhong<sup>1,2</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** For solving the problem that the frequency and voltage of microgrid are easily affected by load fluctuation and consequently deviate from the rated value, a comprehensive frequency and voltage control strategy based on virtual synchronous generator is proposed. The rated angular frequency is selected as the reference value of the damping link of swing equation based on comparing two cases of the reference value. And then, an automatic generation control system is designed by combining the virtual governor with the swing equation to realize no-error control on frequency. Subsequently, aiming at the defect that the voltage feedback needs the support of communication system, a revised voltage amplitude estimator is introduced to estimate the voltage of PCC (Point of Common Coupling) accurately. Under the action of automatic voltage controller, the secondary voltage regulation of PCC can be accomplished without configuring communication system, so that the economy is improved. Furthermore, the small-signal model of system is derived, and the influences of key parameters on the system stability are analyzed.

**Key words:** virtual synchronous generator; virtual governor; voltage estimation; small-signal model; frequency stability; voltage stability

(上接第20页 continued from page 20)

## Dynamic load accurate allocation method for annular DC microgrid based on power flow calculation

LI Yumei<sup>1</sup>, ZHA Xiaoming<sup>2</sup>, SUN Pan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** As for DC microgrid with large-span and annular network structure, the power flow calculation method of annular DC microgrid with droop control is firstly deduced. On this basis, the dynamic load allocation control methods with the droop coefficient ratio and reference voltage difference as control variables are compared and analyzed. Furthermore, an improved droop control method is proposed to comprehensively realize accurate control of dynamic load allocation and compensation of load voltage drop. Finally, a hardware-in-the-loop real-time simulation experimental platform of the four-terminal annular DC microgrid is built, and experimental results verify the effectiveness of the proposed control method.

**Key words:** DC microgrid; annular network; droop control; power flow calculation; dynamic load allocation; voltage drop compensation