

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202013

## 基于下垂控制的低压微电网故障控制策略

王子豪, 牟龙华, 方重凯

(同济大学电气工程系, 上海 201804)

**摘要:** 下垂控制的分布式电源(Distributed Generation, DG)接入孤岛微电网时, 可在故障时呈现电压源特性以维持母线电压稳定。针对低压线路与 DG 对短路电流贡献能力较弱的特点, 分析了非故障与对称故障时 DG 输出功率与母线电压的关系。提出了故障时根据输出阻抗以设置有功、无功输出参考值与改进的下垂控制策略, 解决了故障时电压骤降与频率波动对输出功率的影响。计及 DG 输出电流受限的情况下, 实现了故障时以最大功率输出并尽可能提高母线电压的目的。仿真算例结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 分布式电源; 微电网; 下垂控制; 电压支撑; 故障控制策略

### Fault control strategy of a low-voltage microgrid based on droop control

WANG Zihao, MU Longhua, FANG Chongkai

(Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** When droop-controlled Distributed Generation (DG) is connected to an islanding microgrid, it can present voltage source characteristics under a fault condition and maintain voltage stability of buses. According to the characteristics of DGs' weak contribution to short-circuit current in the low-voltage microgrid, the relationship between DG output power and bus voltage under non-fault and symmetrical fault conditions is analyzed. An improved droop control strategy is presented and the reference values of active and reactive power output are set according to the output impedance. Therefore, the influence of voltage sag and frequency fluctuation on the output power of DGs is avoided. Considering the current limiting output, DGs can output maximum power and improve the bus voltage when a fault occurs in the microgrid. The simulation results show the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 22120200230).

**Key words:** distributed generation; microgrid; droop control; voltage support; fault control strategy

## 0 引言

微电网可在并网与孤岛两种模式下运行<sup>[1-2]</sup>, 为用户提供高质量、安全的电能而受到广泛关注<sup>[3-4]</sup>。DG 通过逆变器接入微电网, 使用不同的控制策略实现无功补偿、不平衡电流补偿、改善电能质量等诸多功能<sup>[5]</sup>。故障时, DG 可产生或保持特定的故障特征, 达到故障控制的目的。

微电网中存在主从控制与对等控制两种模式<sup>[6]</sup>。对等控制中, 各 DG 地位均等, 根据接入系统点处电压、频率就地控制, 无需通信<sup>[7]</sup>。电压源型控制具有电压支撑功能而广泛应用于对等控制微电

网中, 其不需要依靠某个 DG 作为主电源而实现了所有 DG 的即插即用功能<sup>[8]</sup>。下垂控制与虚拟同步电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制模仿同步电机中的下垂特性, 是目前对等控制中应用于 DG 的主要控制方法<sup>[9-10]</sup>。将下垂控制应用于电压源型逆变器并网系统中, 可实现微电网在并网、孤岛两种模式中无缝切换<sup>[11]</sup>。文献[12]提出了一种基于线性逐次逼近修正的改进下垂控制方法, 在并网-孤岛切换时加入积分环节, 提高了稳定性。文献[13]将最大功率点跟踪控制嵌入到下垂控制中, 提出了一种有功功率内环、直流电压外环的控制方法, 实现了 DG 在并网、孤岛运行模式中无缝切换。针对下垂控制的功率耦合问题, 文献[14]提出了一种基于自适应虚拟阻抗的下垂控制方法, 在低压微电网中通过引用虚拟阻抗自适应地抑制了有功、无功

基金项目: 中央高校基本科研业务费用专项资金资助(22120200230)

耦合。文献[15]通过自适应修改下垂系数解决了低压微电网中 2 台 DG 的功率均分问题。文献[16]比较了下垂控制与 VSG 的异同, 得出了 VSG 是一种特殊的下垂控制的结论, 并提出了一种通用型下垂控制方法。其同时具备了下垂控制与 VSG 的优点。但其在具有较好的抗扰动能力的同时也有较下垂控制输出响应较慢的缺点。

DG 通过逆变器接入微电网, 具有控制灵活、响应快速的特点。但受功率器件的限制, 故障时 DG 并不具备传统同步电机提供较大短路电流的能力。但其可在故障时产生或维持特定的故障特征, 以实现快速定位故障点的效果。文献[17]提出了一种电流注入法, 当微电网发生故障时, 向微电网中注入 5 次基频电流, 基于注入电流分量大小以判断故障点位置。但该方法会影响微电网中的电能质量。文献[18]提出了一种主从控制孤岛微电网的故障优化控制策略, 分析了故障时 DG 进行低电压穿越而引起的无功倒送问题, 提出了协调主电源与从电源的故障优化控制策略。文献[19]分析了  $V/f$  控制 DG 的故障模型, 并分析了在限流情况下, 设置参考值的最优方法。但上述方法都是基于电流型 DG 或主从控制微电网的, 并不适用于下垂控制型 DG。

因此, 在充分计及逆变器输出电流受限的情况下, DG 在进行低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)时应尽可能提高母线电压, 并不改变故障特性, 以实现故障控制的目的。本文从传统下垂控制策略出发, 分析了非故障、对称故障情况下 DG 内电势、母线电压与输出有功、无功功率的一般关系。总结得出了在 DG 限流情况下有功、无功参考值设置的一般方法。并提出了一种改进的下垂故障控制策略以消除故障时电压骤降、频率波动对 DG 输出的影响。最后, 在 Matlab/Simulink 中搭建孤岛微电网仿真模型, 验证了下垂故障控制策略的有效性。

## 1 下垂控制功率分析

图 1 为 2 台电压源型 DG 并网运行时的等效模型。 $Z_{load}$  为负载等效阻抗,  $U_L \angle 0^\circ$  为公共母线电压。

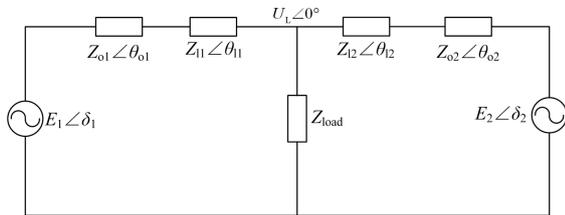


图 1 电压源型 DG 并网运行等效模型

Fig. 1 Equivalent model of grid-connected voltage source DG

DG 的内电势用  $E_i \angle \delta_i$  表示, 其等效输出阻抗为  $Z_{oi} \angle \theta_{oi}$ , 线路阻抗为  $Z_{li} \angle \theta_{li}$ 。

令  $Z_i \angle \theta_i = Z_{oi} \angle \theta_{oi} + Z_{li} \angle \theta_{li}$ ,  $i=1,2$ 。由图 1 可得第  $i$  台 DG 的输出功率为

$$\begin{cases} P_i = \frac{E_i U_L \sin \delta_i}{Z_i} \sin \theta_i + \frac{E_i (E_i - U_L \cos \delta_i)}{Z_i} \cos \theta_i \\ Q_i = -\frac{E_i U_L \sin \delta_i}{Z_i} \cos \theta_i + \frac{E_i (E_i - U_L \cos \delta_i)}{Z_i} \sin \theta_i \end{cases} \quad (1)$$

在低压配电网中,  $Z_{li}$  较小且呈阻性。DG 采用下垂控制, 为避免线路参数引起的有功、无功功率耦合影响, 采用虚拟阻抗或 LCL 滤波器使 DG 对外呈感性<sup>[20]</sup>。故  $Z_{oi} \gg Z_{li}$ , 则  $\theta_i \approx 90^\circ$ 。因此式(1)可简化为

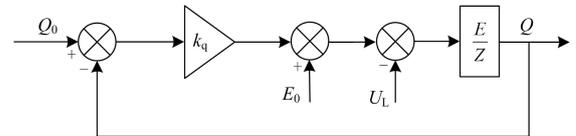
$$\begin{cases} P_i = \frac{E_i U_L \delta_i}{Z_i} \\ Q_i = \frac{E_i (E_i - U_L)}{Z_i} \end{cases} \quad (2)$$

DG 并网正常运行时, 总阻抗  $Z_i$  固定, 负载电压  $U_L$  为恒定值。由式(2)可知, DG 输出的有功、无功功率与其幅值  $E_i$  及相角  $\delta_i$  相关。式(2)满足  $P$ - $f$ 、 $Q$ - $E$  下垂原理。

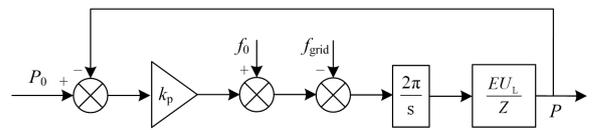
$$\begin{cases} f_i = f_0 - k_{pi} (P_i - P_0) \\ E_i = E_0 - k_{qi} (Q_i - Q_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f_0$ 、 $E_0$ 、 $P_0$ 、 $Q_0$  分别为额定频率、额定电压、额定有功功率与额定无功功率;  $f_i$ 、 $E_i$ 、 $P_i$ 、 $Q_i$  为第  $i$  台 DG 的频率、输出电压、输出有功与无功功率;  $k_{pi}$ 、 $k_{qi}$  分别为第  $i$  台 DG 的有功、无功下垂系数。

由式(2)、式(3)可以得到图 2 所示的传统下垂控制策略框图。其中图 2(a)为  $Q$ - $E$  控制框图,  $k_q$  为无功下垂系数,  $Z$  为总阻抗。则 DG 输出无功功率为



(a)  $Q$ - $E$ 控制框图



(b)  $P$ - $f$ 控制框图

图 2 传统下垂控制策略框图

Fig. 2 Control block diagram of traditional droop control

$$Q(s) = \frac{k_q E}{k_q E + Z} Q_0(s) + \frac{E_0 - U_L}{k_q E + Z} E(s) \quad (4)$$

由于  $k_q E \gg Z$ ，则式(4)可化简为

$$Q \approx Q_0 + \frac{E_0 - U_L}{k_q} \quad (5)$$

DG 正常运行时， $E_0$ 、 $U_L$  为定值。电网受到扰动或发生故障时  $U_L$  变化。故由式(2)、式(5)可知，无功输出功率与  $E_i$ 、 $U_L$  相关，DG 输出的无功功率不能跟踪  $Q_0$  且存在误差。

图 2(b)为  $P$ - $f$  控制框图， $k_p$  为有功下垂系数， $f_0$  为额定频率， $f_{\text{grid}}$  为电网频率。则 DG 输出的有功功率为：

$$P(s) = \frac{2\pi k_p E U_L}{2\pi k_p E U_L + SZ} P_0(s) + \frac{2\pi E U_L}{2\pi k_p E U_L + SZ} (f_{\text{grid}}(s) - f_0(s)) \quad (6)$$

$P_0$ 、 $f_0$  与  $f_{\text{grid}}$  为定值，对式(6)进行拉氏变换，可得：

$$P(s) = \frac{2\pi k_p E U_L}{2\pi k_p E U_L + Zs} \frac{P_0}{s} + \frac{2\pi E U_L}{2\pi k_p E U_L + Zs} \frac{(f_{\text{grid}} - f_0)}{s} \quad (7)$$

对式(7)使用终值定理，可得：

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} P(t) = \lim_{s \rightarrow 0^+} sP(s) = P_0 + \frac{f_{\text{grid}} - f_0}{k_p} \quad (8)$$

结合式(2)、式(3)、式(7)可知，DG 输出的有功功率与  $E_i$ 、 $U_L$  及内电势相角  $\delta_i$  有关，微电网正常运行时  $f_{\text{grid}}$  为定值，发生扰动或故障时  $f_{\text{grid}}$  变化。故由式(8)可知，DG 输出的有功功率不能跟踪  $P_0$  且存在误差。

由图 2 与式(2)可知，微电网正常运行时  $U_L$ 、 $f_{\text{grid}}$  恒定，DG 可等效为电流源。故通过合理的逆变器及控制参数设置可实现非故障情况下的孤岛微电网功率均分。

## 2 对称故障功率分析

当孤岛运行的微电网发生故障时，DG 需要进行低电压穿越。由于系统拓扑的影响，各 DG 所在母线电压跌落情况不一致，故此时功率均分策略并不适用。受功率器件的限制，逆变型 DG 不具备提供较大短路电流的能力。本文 DG 输出的最大电流取为额定电流的 2 倍。为避免电网短路时 DG 输出过大而进入饱和的非线性工作区，需对参考值进行重新设置以达到故障控制的目的。

DG 接入微电网或配电网时需通过锁相环 (Phase Locked Loop, PLL) 对公共连接点电压的幅值、相位进行锁定与计算，或计算出公共连接点电压的正、负、零序电压幅值及其相位。对于三相 PLL 而言，所计算出的为三相平均幅值。图 3 为微电网发生短路故障时 DG 的等效电路图， $U_f \angle 0^\circ$  为短路故障点电压， $E \angle \delta$  为内电势， $R_f$ 、 $X_f$  为 DG 至短路故障点阻抗。

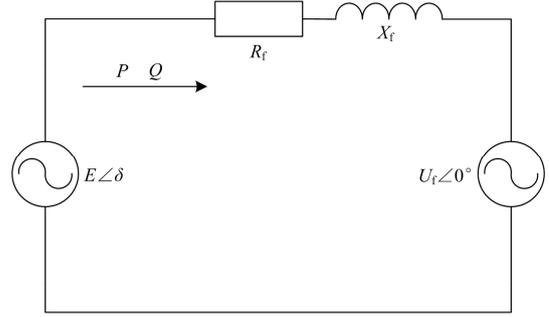


图 3 故障时等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit under fault condition

由图 3 可知，考虑  $|\delta| < 5^\circ$  且使用弧度制，则 DG 输出功率为

$$\begin{cases} P \approx \frac{E[ER_f - U_f R_f + U_f X_f \delta]}{R_f^2 + X_f^2} \\ Q \approx \frac{E[EX_f - U_f X_f - U_f R_f \delta]}{R_f^2 + X_f^2} \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9)，短路故障点电压可表示为

$$\begin{cases} U_f = \frac{E^2 - (PR_f + QX_f)}{E} \\ \frac{dU_f}{dE} = 1 + \frac{PR_f + QX_f}{E} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知，故障时 DG 向微电网输入有功、无功功率时， $dU_f/dE$  恒大于 0，为增函数，即故障点电压随 DG 输出功率升高而升高。但由于 DG 输出电流受限，视在功率最大值  $S_{\text{max}} = |E| |I_{\text{max}}|$  小于额定状态，故需对输出参考值进行重新设置以达到更好的故障控制效果。

由图 3 与式(9)可得：

$$\begin{cases} E = \frac{U_f + \sqrt{U_f^2 + 4(PR_f + QX_f)}}{2} \\ \frac{dE}{dP} = \frac{QR_f - PX_f}{Q\sqrt{U_f^2 + 4(PR_f + QX_f)}} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知，当 DG 的视在功率  $S$  一定且输出有功、无功功率大于 0 时，内电势  $E$  存在极大值。

即  $QR_f - PX_f = 0$ 、 $P/Q = R_f/X_f$  时内电势  $E$  达到最大值, 此时输出功率为:

$$\begin{cases} P = \frac{R_f S}{\sqrt{R_f^2 + X_f^2}} \\ Q = \frac{X_f S}{\sqrt{R_f^2 + X_f^2}} \end{cases} \quad (12)$$

当孤岛微电网发生对称故障时, 下垂控制的 DG 呈现电压源特性, 期望最大程度地支撑母线电压, 并快速度过暂态过程。故障时, 各 DG 并网点电压跌落不一致, 此时功率均分策略不再适用, 需对各 DG 的控制策略进行改进。

当微电网发生三相短路故障时, 电路中只存在正序分量。图 4 为对称故障时 DG 等效正序电路图。DG 的正序内电势为  $E^+ \angle \delta_f^+$ ; 微电网故障时正序电压为  $U^+ \angle \delta_f^+$ ; DG 至短路点总阻抗为  $Z_s = R_s + jX_s$ 。

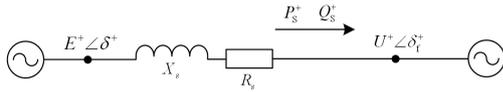


图 4 对称故障等效正序电路图

Fig. 4 Equivalent positive sequence circuit diagram under symmetrical fault condition

则 DG 输出的正序故障功率为

$$\begin{cases} P_s^+ = 3 \frac{U^+ [-U^+ R_s + E^+ R_s \cos(\delta^+ - \delta_f^+) + E^+ X_s \sin(\delta^+ - \delta_f^+)]}{R_s^2 + X_s^2} \\ Q_s^+ = 3 \frac{U^+ [-U^+ X_s + E^+ X_s \cos(\delta^+ - \delta_f^+) - E^+ R_s \sin(\delta^+ - \delta_f^+)]}{R_s^2 + X_s^2} \end{cases} \quad (13)$$

由于 DG 接入微电网时需通过 PLL 对并网点电压幅值、相位进行锁定与计算, 考虑  $|\delta^+ - \delta_f^+|$  且使用弧度制, 则式(13)可化简为:

$$\begin{cases} P_s^+ \approx 3 \frac{U^+ R_s (E^+ - U^+)}{R_s^2 + X_s^2} \\ Q_s^+ \approx 3 \frac{U^+ X_s (E^+ - U^+)}{R_s^2 + X_s^2} \end{cases} \quad (14)$$

式(13)、式(14)中, DG 向微电网输出的正序有功功率随正序内电势升高而升高, 当  $|\delta^+ - \delta_f^+|$  较小时,  $|P^+|/|Q^+|$  比值也等于总阻抗  $R_s/X_s$  比值。

微电网故障时, 由式(10)、式(11)、式(13)、式(14)可总结出 DG 输出的一般规律: 微电网电压随 DG 内电势、输出有功、无功功率升高而升高; 当输出功率  $P/Q = R_f/X_f$  时, DG 内电势最大, 对所连接母线电压支撑最佳。

### 3 下垂故障控制策略

在低压微电网中, 由于线路较短, 且本文使用 LCL 滤波器, 故  $R_s \approx R_f$ ,  $X_s \approx X_f$ , DG 至并网点阻抗基本上由 DG 的输出阻抗决定。结合上文分析, 微电网发生故障时, DG 应按输出有功、无功功率比等于  $R_s/X_s$  以最大程度支撑母线电压。

DG 在微电网故障时须快速实现故障控制, 必须快速检测、确定故障参数及参考值, 且为避免输出电流过大长时间进入非线性饱和区损坏电力电子器件而留有一定的输出裕量。则微电网发生三相对称故障时功率参考值设置为

$$\begin{cases} P_{\text{ref}} = k \sqrt{\frac{S_f}{1+k^2}} \\ Q_{\text{ref}} = \sqrt{\frac{S_f}{1+k^2}} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $S_f$  为故障时 DG 最大视在功率;  $k$  为比例系数。

考虑到故障时 DG 的短路电流贡献能力较小、发生高阻故障时故障线路的正序电压变化不明显等因素, 本文利用母线的正、负、零序电压的故障分量幅值作为下垂故障控制策略的启动判据。

$$|\Delta u^+| + |\Delta u^-| + |\Delta u^0| > U_{\text{set}} \quad (16)$$

式中:  $\Delta u^+$ 、 $\Delta u^-$ 、 $\Delta u^0$  分别表示母线的正、负、零序电压的故障分量;  $U_{\text{set}}$  为启动判据设定值。

改进的下垂故障控制策略如图 5 所示。  $u_L$  为微电网电压,  $i_f$  为 DG 输出电流,  $k_{pp}$ 、 $k_{ip}$ 、 $k_{pq}$ 、 $k_{iq}$  分别为有功、无功的比例、积分系数;  $K_p$ 、 $K_q$  分别为有功、无功功率参考值切换开关。正常情况下,  $K_p$ 、 $K_q$  分别连接额定参考值  $P_0$ 、 $Q_0$ , DG 运行于正常模式下。DG 通过 PLL 检测  $u_L$ , 将其按正、负、零序分解, 若满足式(16), 则认为微电网中发生故障。此时 DG 运行于故障模式,  $K_p$ 、 $K_q$  分别连接故障时有功、无功功率参考值  $P_{\text{ref}}$ 、 $Q_{\text{ref}}$ , 其值由  $u_L$  与  $i_f$  经过式(14)、式(15)计算得出。本文使用功率作为直接控制对象, 与直接控制输出电压、电流相比, 避免了故障时电压骤降的电压差所带来的冲击。为更好地实现功率跟踪, 由图 5 可得:

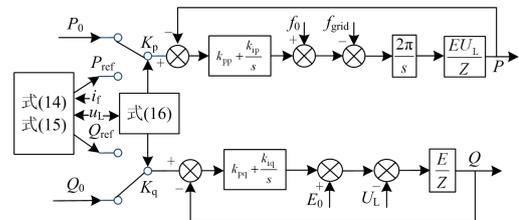


图 5 改进的下垂故障控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of improved droop fault control strategy

$$Q(s) = \frac{k_{pq}Es + k_{iq}E}{(k_{pq} + Z)s + k_{iq}E} Q_{\text{ref}}(s) + \frac{E_0 - U_L}{(k_{pq} + Z)s + k_{iq}E} E(s) \quad (17)$$

由终值定理可得:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} Q(t) = \lim_{s \rightarrow 0^+} sQ(s) = Q_{\text{ref}} \quad (18)$$

其有功功率为

$$P(s) = \frac{k_{pp}2\pi EU_L s + k_{ip}2\pi EU_L}{Zs^2 + k_{pp}2\pi EU_L s + k_{ip}2\pi EU_L} P_{\text{ref}}(s) + \frac{2\pi EU_L s}{Zs^2 + k_{pp}2\pi EU_L s + k_{ip}2\pi EU_L} (f_{\text{grid}}(s) - f_0(s)) \quad (19)$$

由终值定理可得

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} P(t) = \lim_{s \rightarrow 0^+} sP(s) = P_{\text{ref}} \quad (20)$$

对比式(4)、式(5)与式(17)、式(18)可知,改进的下垂控制策略可以使得 DG 无差跟踪新的无功参考信号  $Q_{\text{ref}}$ ,而与无功下垂系数  $k_q$  无关。对比式(6)、式(7)、式(8)与式(19)、式(20)可知,改进的下垂控制策略使得 DG 可以无静差地跟踪新的无功参考信号  $P_{\text{ref}}$ ,与有功下垂系数  $k_p$  无关,避免了电压波动而影响有功输出。本文所提出的改进下垂控制策略消除了电网电压、频率波动、故障时电压骤降的影响,使得 DG 在故障时能更好地跟踪有功、无功参考信号,从而达到故障控制与电压支撑的目标。

## 4 仿真分析

本文提出的改进下垂控制算法基于  $d-q$  旋转坐标系,发生对称故障时,可直接在  $d-q$  坐标系中对 DG 进行控制。发生不对称故障时,本文所提出的改进下垂控制算法可在  $\alpha-\beta$  坐标系或三相静止坐标系中分相控制,同样适用于不对称故障。本文仅对对称故障进行仿真分析。

在 Matlab/Simulink 建立如图 6 所示的孤岛微电网模型。微电网的电压等级为 380 V,频率为 50 Hz。DG1~DG4 均采用图 5 所示改进的下垂故障控制策略,其额定功率均为 8.5 kVA,最大输出电流为额定电流的 2 倍。LD1~LD3 均为三相恒功率负载,额定功率为  $(10+j5)$  kVA。线路 AB、BC、AD 长度均为 0.2 km,负荷经 0.1 km 线路连接至母线,线路正序阻抗为  $Z=(0.642+j0.083)$   $\Omega/\text{km}$ 。DG 直接连接在母线上。

为验证所提故障控制策略的有效性,本文使用两个算例进行验证。算例 1 如图 6 所示,故障时,故障馈线两端均有采用故障控制策略的 DG 进行功率支撑。为对比故障时故障控制策略的电压支撑效

果,算例 2 如图 9 所示,此时故障馈线只有一端含有故障控制策略的 DG 进行故障时功率支撑。

### 4.1 算例 1

0.3 s 时,在 BC 中点处发生三相短路故障,过渡电阻为 3  $\Omega$ 。此时母线 B 与 C 电压相差不大,测量母线 C 电压和 DG2 输出电流波形分别如图 7、图 8 所示。故障前电压峰值为 311 V,故障后电压峰值为 300 V。DG2 在故障前输出电流峰值为 19 A,使用图 5 所示改进的下垂故障控制策略,在故障发生后经过一个周期的调整输出电流被锁定在 2 倍额定电流峰值 38 A,能很好地进行低电压穿越并维持在最大输出电流内,且对母线 C 进行良好的电压支撑,维持了母线 C 电压稳定。此时,母线 A 电压峰值为 308 V,母线 D 电压峰值为 305 V。

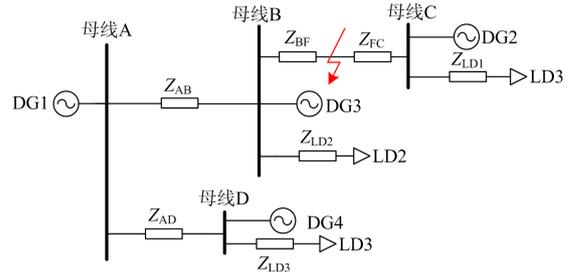


图 6 微电网模型

Fig. 6 Model 1 of microgrid

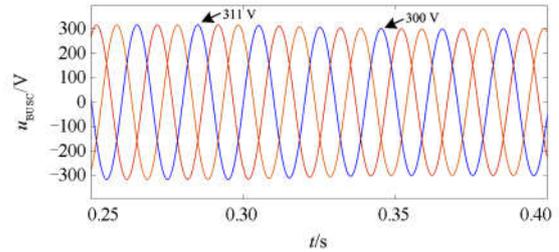


图 7 母线 C 电压波形

Fig. 7 Voltage waveform of bus C

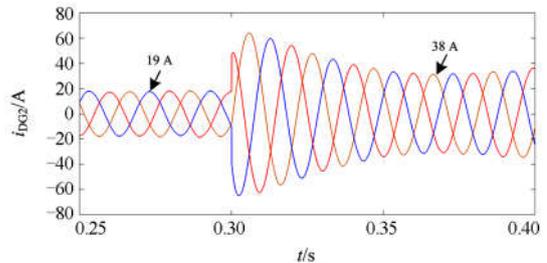


图 8 DG2 输出电流波形

Fig. 8 Output current waveform of DG2

### 4.2 算例 2

建立如图 9 所示孤岛微电网模型,此时母线 C 处无 DG2,其余参数与算例 1 相同。

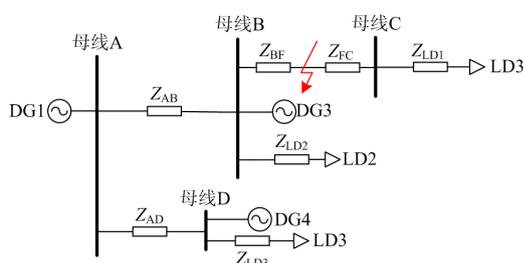


图9 微电网模型

Fig. 9 Model 2 of microgrid

0.3 s 时, 在 BC 中点处发生三相短路故障, 过渡电阻为  $3 \Omega$ 。由图 10 可知, 故障前母线电压峰值为 311 V, 故障后母线 B 电压峰值跌落至 292 V, 母线 C 则跌落至 281 V。母线 B 处 DG3 采用改进的下垂故障控制策略, 图 11 中故障前输出电流峰值为 24 A, 故障后电流峰值被控制在 2 倍额定电流峰值 39 A。DG3 很好地进行了低电压穿越并维持了母线 B 电压稳定。此时, 母线 A 电压峰值为 305 V, 母线 D 电压峰值为 300 V。

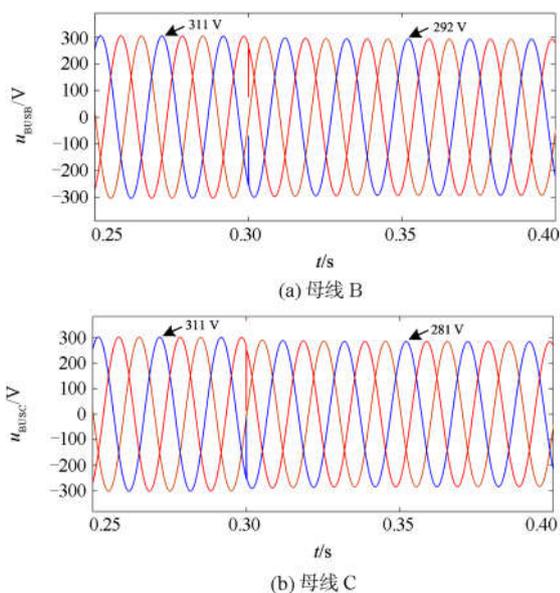


图 10 故障时母线电压波形

Fig. 10 Bus voltage waveform under fault condition

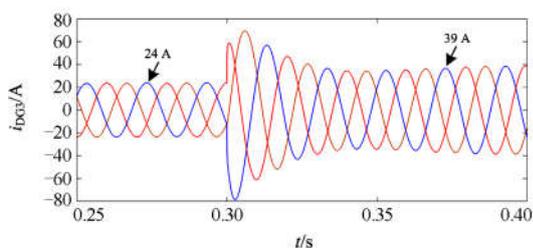


图 11 DG3 输出电流

Fig.11 Output current waveform of DG3

对比算例 1 与算例 2, 由图 7 与图 10(b)可知, 在母线 C 处无 DG2 时电压峰值跌落将近 20 V, 并且在图 7 中, 由于电压源型 DG2 对母线 C 起到良好的支撑作用, 母线 C 未出现明显的电压骤降情况。算例 2 中的母线 C 由于缺少 DG2 支撑, 故障发生时出现了明显电压骤降过程; 母线 B 处有 DG3 接入, 其电压峰值跌落较少。由于缺少 DG2 的功率支撑, 算例 2 中的母线 A、D 均有一定程度的下降。证明使用图 5 所示的控制策略后, DG 能在故障时进行低电压穿越的同时很好地对所在母线进行电压支撑, 使得在发生三相对称故障时, 母线电压依然能维持在较高水平。

## 5 结论

本文对低压孤岛微电网中 DG 的下垂控制策略进行了研究, 提出了一种根据输出阻抗设置有功、无功输出参考值的改进下垂故障控制策略。该策略在微电网发生故障时, 通过修改输出功率参考值并充分计及 DG 的输出电流受限的情况, 能较好地解决微电网中电压、频率波动对输出功率的影响, 使得 DG 能无差地跟踪有功、无功参考值, 实现了低电压故障穿越控制的同时维持母线电压稳定且处于较高水平。

## 参考文献

- [1] 田梁玉, 唐忠, 田晨, 等. 基于状态跟随器的微电网平滑切换研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1285-1290.  
TIAN Liangyu, TANG Zong, TIAN Chen, et al. Research of microgrid seamless switching based on state follower[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1285-1290.
- [2] 吕振宇, 苏晨, 吴在军, 等. 孤岛型微电网分布式二次调节策略及通信拓扑优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 209-219.  
LÜ Zhenyu, SU Chen, WU Zaijun, et al. Distributed secondary control strategy and its communication topology optimization for islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 209-219.
- [3] 范其丽, 郑晓茜, 王璞, 等. 基于混合储能动态调节的独立混合微电网分布式协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 105-114.  
FAN Qili, ZHENG Xiaoxi, WANG Pu, et al. Decentralized control for autonomous hybrid microgrid with hybrid storage system dynamical regulating[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 105-114.
- [4] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微电网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.  
WANG Chengshan, XIAO Chaoxia, WANG Shouxiang. Integrated control and analysis of micro-power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.

- [5] ZHANG Fan, MU Longhua. New protection scheme for internal fault of multi-microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 159-170. DOI: 10.1186/s41601-019-0127-3.
- [6] 张雪松, 赵波, 李鹏, 等. 基于多层控制的微电网运行模式无缝切换策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 179-184.  
ZHANG Xuesong, ZHAO Bo, LI Peng, et al. Seamless switching strategies for microgrid based on multi-layer control architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 179-184.
- [7] 马艺玮, 杨苹, 吴捷, 等. 含多分布式电源独立微电网的混合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 103-109.  
MA Yiwei, YANG Ping, WU Jie, et al. Hybrid control strategy of islanded microgrid with numerous distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 103-109.
- [8] 李红萍, 杨洪耕, 张浩. 基于下垂控制的微电网新型控制策略[J]. 可再生能源, 2015, 33(8): 1148-1153.  
LI Hongping, YANG Honggeng, ZHANG Hao. A new control strategy of microgrid based on droop control[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(8): 1148-1153.
- [9] SHUAI Zhikang, SHEN Chao, YIN Xin, et al. Fault analysis of inverter-interfaced distributed generators with different control schemes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1223-1235.
- [10] 晁凯云, 苗世洪, 刘子文, 等. 基于虚拟同步电机控制的微电网稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 9-16.  
CHAO Kaiyun, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. Stability analysis of microgrid based on virtual synchronous generator control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 9-16.
- [11] 刘鸿鹏, 朱航, 吴辉, 等. 新型光伏并网逆变器电压型控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5560-5568.  
LIU Hongpeng, ZHU Hang, WU Hui, et al. A novel voltage-controlled method for the grid-connected photovoltaic inverter[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(21): 5560-5568.
- [12] 徐晓宁, 周雪松. 微网脱/并网运行模式平滑切换控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2754-2760.  
XU Xiaoning, ZHOU Xuesong. Control strategy for smooth transfer between grid-connected and island operation for microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2754-2760.
- [13] 贾要勤, 武荣, 何巧惠. 基于下垂控制与MPPT的电压源型光伏并网逆变器[J]. 电力电子技术, 2018, 52(9): 98-102.  
JIA Yaoqin, WU Rong, HE Qiaohui. Voltage source grid-connected photovoltaic inverters based on MPPT and droop control[J]. Power Electronics, 2018, 52(9): 98-102.
- [14] 王二永, 王帅. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 144-149.  
WANG Eryong, WANG Shuai. Low voltage microgrid droop control strategy based on adaptive virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 144-149.
- [15] 王二永, 王帅. 自适应下垂系数的低压微电网功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 52-56.  
WANG Eryong, WANG Shuai. Power control strategy of low voltage microgrid based on adaptive droop coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 52-56.
- [16] MENG Xin, LIU Jinjun, LIU Zeng. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(6): 5416-5438.
- [17] CHEN Zhi, PEI Xuejun, YANG Min, et al. A novel protection scheme for inverter-interfaced microgrid (IIM) operated in islanded mode[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7684-7697.
- [18] 张凡, 牟龙华, 王子豪, 等. 主从控制孤岛微电网的优化故障控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1241-1248.  
ZHANG Fan, MU Longhua, WANG Zihao, et al. Optimal fault control strategy of master-slave controlled islanding microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1241-1248.
- [19] 郭文明, 牟龙华, 刘爽, 等. U/f 控制微电源的故障控制策略和故障模型分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1125-1135.  
GUO Wenming, MU Longhua, LIU Shuang, et al. Fault control strategy and fault model analysis of U/f controlled micro sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1125-1135.
- [20] ZHAO Mingquan, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Modeling of DFIG wind turbine based on internal voltage motion equation in power systems phase-amplitude dynamics analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1484-1495.

收稿日期: 2020-06-25; 修回日期: 2020-10-12

作者简介:

王子豪(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为微电网保护与控制; E-mail: zhwang@tongji.edu.cn

牟龙华(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网、电能质量; E-mail: lhmu@tongji.edu.cn

方重凯(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为微电网及智能配电网的保护与控制。

(编辑 张爱琴)