Journal of Electrical Engineering 电气工程, 2016, 4(1), 44-54
Published Online March 2016 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/jee
http://dx.doi.org/10.12677/jee.2016.41007

Hans汉斯

Fault Analysis of Isolated Island Operation of Micro-Grid

Junjie Jiang, Rong Ju

School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu
Email: jangtra@sina.com, jurong@njnu.edu.cn

Received: Feb. 16th, 2016; accepted: Mar. 1st, 2016; published: Mar. 8th, 2016

Abstract

Micro-grid system is a new development direction of distributed generation system. In this paper, the operation characteristics of PQ and VF control inverter are analyzed, the mathematical model is established based on the control strategy of inverter, and the critical condition of the fault is derived. According to the working characteristics of the micro-grid in grid connected operation and islanded operation, by using the node voltages and currents in fault condition, micro-grid voltage and current equations in the run time are derived, and the fault analysis method is established. At last, by using the PSCAD, a simulation system of isolated island operation of low voltage of 380 V is built, testing the validity of the proposed method.

Keywords

Micro-Grid, PQ Control Strategy, VF Control Strategy, Equivalent Model, Mathematical Analysis

微电网孤岛运行故障分析

蒋骏杰，居　荣

南京师范大学电气与自动化工程学院，江苏　南京
Email: jangtra@sina.com, jurong@njnu.edu.cn

收稿日期：2016年2月16日；录用日期：2016年3月1日；发布日期：2016年3月8日

文章引用：蒋骏杰，居荣．微电网孤岛运行故障分析[J]．电气工程, 2016, 4(1): 44-54.
http://dx.doi.org/10.12677/jee.2016.41007

摘 要

微电网系统是分布式发电系统的新发展方向。本文针对微电网故障问题，首先分析了PQ与VF控制逆变器的运行特点，建立了基于逆变器控制策略的数学模型，并且推导了故障临界条件。结合微电网并网以及孤岛运行时的工作特点，利用故障时的节点电压与电流，推导出了微电网在故障运行时候的电压与电流求解方程，并以此建立了故障分析方法。最后利用PSCAD建立了380 V低压电力系统孤岛运行的仿真系统，验证了所述方法的正确性。

关键词

微电网，PQ控制策略，VF控制策略，等值模型，数值分析

1. 引言

近年来，为了应对能源危机，分布式发电技术受到了广泛的关注。作为分布式发电技术的再发展，能够灵活的在并网与孤岛运行切换的微电网系统逐渐成为了行业内新的研究新方向 [1]-[5]。

当微电网处于并网运行状态时，分布式发电系统主要采用恒功率(PQ)控制方式。目前，对于 PQ 控制系统的等值模型，已经不少学者做了广泛研究 [6]。以正常并网状态的逆变器控制策略为依据，将微电网系统划分为不同节点，利用前推回代法求解系统状态 [7] [8]。指出在分析并网故障时要考虑补偿控制策略的影响，将 DG 等效为压控电流源模型，指出其存在电流饱和特性，并且分析了在对称与不对称故障下的系统状态特性，但是未考虑 PQ 控制逆变器存在的电压饱和特性。

当配电网由于故障等原因，使得微电网系统进入孤岛运行模式时，一般会有一个分布式发电系统或者储能装置采用恒压－恒频(VF)控制方式，向整个微电网系统提供电压与频率支撑，使的其他采用 PQ 控制的分布式系统能够继续正常工作 [9] [10]。指出由于大多数 VF 控制系统往往采用电压型并网逆变器，为了保证系统稳定，其直流侧一般都配有大电容，因此在分析其故障状态时主要从逆变器控制策略的角度出发 [11]。提出 VF 控制逆变器存在电压饱和特性，但是没有考虑到由于容量的限制，VF 控制逆变器存在电流饱和状态。

本文在前人对于 PQ 和 VF 控制逆变器故障特性的分析基础上，通过数学推导，指出了 PQ 控制逆变器存在电压饱和与电流饱和两种极限状态。而 VF 控制的逆变器则存在恒压与电流饱和两种状态，推导了各个故障状态下的边界条件。利用 PSCAD/EMTDC 建立仿真模型，模拟在孤岛运行时发生三相短路故障下的电路暂态特性，并且求出了故障下的电压与电流的具体数值，通过仿真结果互相比较，验证本文所提出的方法的有效性。

2. DG 的控制特性与等值模型

2.1. PQ 控制器特性

在微电网处于并网运行的时候，DG 一般采用 PQ 控制保证系统的功率平衡 [12]。给出了一种典型的 PQ 控制策略，如图 1 所示，可以让 DG 输出的有功和无功电流稳定于参考值，保证功率输出。

在 $dq0$ 坐标系下 PQ 控制的逆变器注入电网的功率如公式(1)所示，根据瞬时无功理论，首先获取 DG 在并网点处的三相瞬时值电流 I_{abc} 与三相瞬时值电压 U_{abc}，将 I_{abc} 与 U_{abc} 进行 $abc/dq0$ 的帕克变换，并且同时选取 d 轴与 u_d 矢量方向相同，使电压 q 轴分量为零，此时即可得到简化的公式(2)，其中 u_d，u_q，i_d，i_q 为逆变器出口侧的电压和电流经过 $dq0$ 坐标变换之后的 d 轴分量和 q 轴分量。P_{grid}，Q_{grid}，P_{ref} 和 Q_{ref}

分别为逆变器输出的有功无功的实际值以及参考值。正常工作时为实现能源的有效使用 Q_{ref} 一般为 0。

$$\begin{cases} P = u_d \times i_d + u_q \times i_q \\ Q = -u_d \times i_q + u_q \times i_d \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} i_{dref} = P_{ref} \div u_d \\ i_{qref} = -Q_{ref} \div u_d \end{cases} \tag{2}$$

对于PQ控制逆变器，故障点的位置，以及故障之后的等效阻抗，其对DG的输出有较大影响。如公式(3)所示，对于任意的逆变器，其并网连接处的电压受到逆变器出口侧的电压和滤波阻抗的影响。

$$\begin{cases} U_{DG} = E_{DG} - Z \times I_{DG} \\ I_{DG} = \dfrac{U_{DG}}{R} \end{cases} \tag{3}$$

U_{DG}为DG并网点的电压，E_{DG}为DG出口侧电压，Z为等效滤波阻抗，I_{DG}为逆变器输出电流，R为故障发生时的等效阻抗。参见图2，故障点所处的位置不同将导致故障发生时的等效电阻R发生改变。

若故障发生在 f1 处则，DG 将失去大电网支持。 由公式(3)可知，$E_{DG} - \frac{U_{DG}}{R} \times Z = I_{DG}$。在常规配电网中，风能，光伏等新能源，其能量变化具有一定的惯性，因此，可以认为故障前后的有功输出 $P = P_{ref}$。由于 $U_{DG} = \sqrt{P_{ref}^2 \times R}$，因此 $E_{DG} = \left(\frac{Z}{R} + 1\right) \times \sqrt{P_{ref} \times R}$。$Z$ 和 P_{ref} 不会发生变化，$\frac{Z}{R} + 1$ 大于 1，故 E_{DG} 和故障发生时的等效阻抗 R 成正比。文献 [11]指出当 DG 采用 SPWM 正弦脉冲宽度调制时，逆变器出口侧的

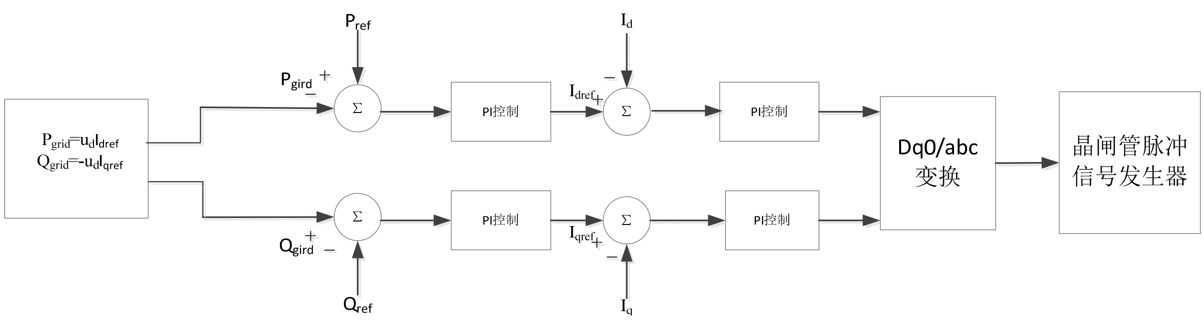

Figure 1. PQ control principle
图 1. PQ 控制原理

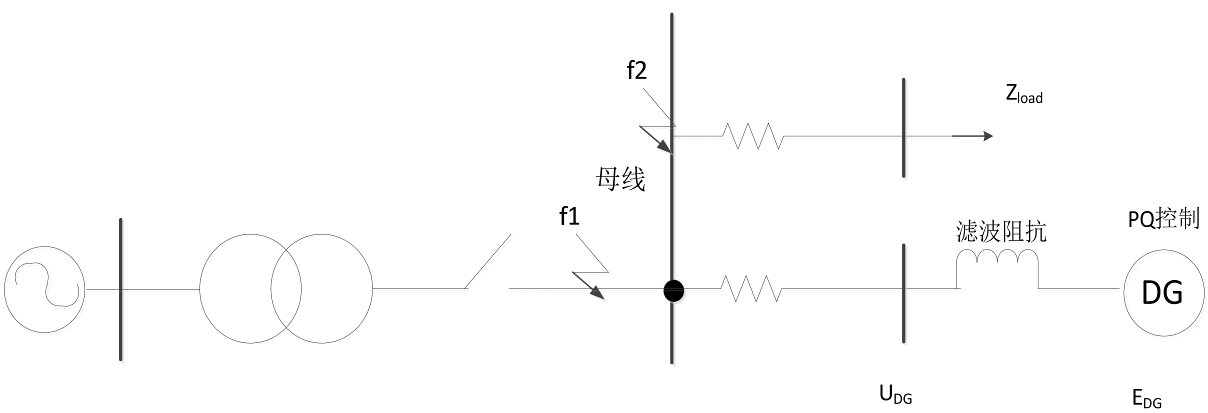

Figure 2. PQ control structure diagram
图 2. PQ 控制结构图

电压有效值由调制系数 P_m 和逆变器直流侧的电压 U_{DC} 共同决定，其中 $P_{m\_\min} = -1$， $P_{m\_\max} = 1$，因此当在不同位置发生故障时存在电压饱和阻抗 R_{EMAX}，导致 $|P_m| = 1$，使得 $|E_{DGMAX}| = \frac{1}{2\sqrt{2}} \times P_m \times U_{DC}$。由于 Q_{ref} 一般很小或者为 0 可以在发生故障之后维持不变，可得 PQ 控制 DG 在 $R_{EMAX} \le R$，电压处于饱和状态下的特性，如公式(4)所示：

$$\begin{cases} E_{DG} = \dfrac{1}{2\sqrt{2}} U_{DC} \\ E_{DG} - I_{DG} \times Z = U_{DG} \\ I_{DG} = \dfrac{U_{DG}}{R} \\ I_{qref} = -\dfrac{Q_{ref}}{U_d} \\ I_{dref} = \sqrt{I_{DG}^2 - I_{qref}^2} \end{cases} \tag{4}$$

当 $R > R_{EMAX}$ 时，由于电压幅值的限制E_{DGMAX}维持不变，则电流I_{DG}将会减小，最终导致功率输出降低。

如果故障位置的改变，如移动到f2位置处，等效阻抗R减小，而且此时仍有上级电网的支持，则根据 $E_{DG} = \left(\frac{Z}{R} + 1\right) \times \sqrt{P_{ref} \times R}$ 可知 E_{DG} 与 U_{DG} 会减小，实际的有功输出P_{out}会瞬时一并减少，因此 $P_{ref} - P_{out}$ 会增大， $i_{dref} = \frac{P_{ref} - P_{out}}{u_d}$ 会变大，最终导致I_{DG}电流变大。文献[12]指出考虑到逆变器的中电力电子元件的耐压承受能力，会在PI控制环节对于对逆变器的最大输出电流作出限制，所以I_{DG}存在大输出电流 $I_{MAX} = \frac{P_{ref}}{R_{IMAX}}$。随着f2所处的位置不同，存在电流饱和阻抗$R_{IMAX}$，当故障电阻 $R < R_{IMAX}$，当电流达到饱和，最终将导致输出功率无法跟随参考值变化而减小。所以故障发生时的，等效阻抗大于 $R_{IMAX} \ll R \ll R_{EMAX}$ 时，DG的输出特性可以用公式(2)与公式(3)描述，此时功率可以正常输出。当等效阻抗大于 $0 \ll R \ll R_{IMAX}$ 时，PQ控制的DG电流达到饱和，此时的输出特性可以描述为公式(5)：

$$\begin{cases} I_{DG} = I_{MAX} \\ I_{qref} = -\dfrac{Q_{ref}}{U_d} \\ I_{dref} = \sqrt{I_{MAX}^2 - I_{qref}^2} \\ E_{DG} - I_{DG} \times Z = U_{DG} \end{cases} \tag{5}$$

本节基于电力系统仿真软件PSCAD/EMTDC，参照图2，搭建了一个的简单仿真模型。其中微电网正常工作电压为311 V，直流侧的电压$U_{DC} = 1000$ V，滤波电路的电感$L = 2$ mH，滤波电容$C = 10$ uF，线路发生故障后的等效阻抗R分别为21 Ω，25 Ω，3 Ω与1 Ω。$P_{ref} = 17$ kW，$Q_{ref} = 0$ kVar。参见图3与图4可见，在0.5秒的时候发生三相短路故障，此时由上面的分析可知，若E_{DG}达到饱和的峰值应等于 $\frac{U_{DC}}{2} = 500$ V，与图3显示的仿真数据吻合，并且从图3，图4以及图5可以看出随着等效故障电阻 $R \ge R_{EMAX}$，DG的输出电流I_{DG}变小。最终导致了功率无法跟随参考值输出。而图6，图7以及图8，则反映了 $0 \ll R \ll R_{IMAX}$，以及 $R < R_{IMAX}$ 时，E_{DG}减小，I_{DG}增大直至饱和，以及功率输出从跟随参考值，到无法维持稳定的过程。

2.2. 恒压恒频控制(VF 控制)模式输出特性分析

恒压恒频控制也称为 VF 控制，其作用是在微电网进入孤岛运行失去大电网的电压与频率支撑之后，

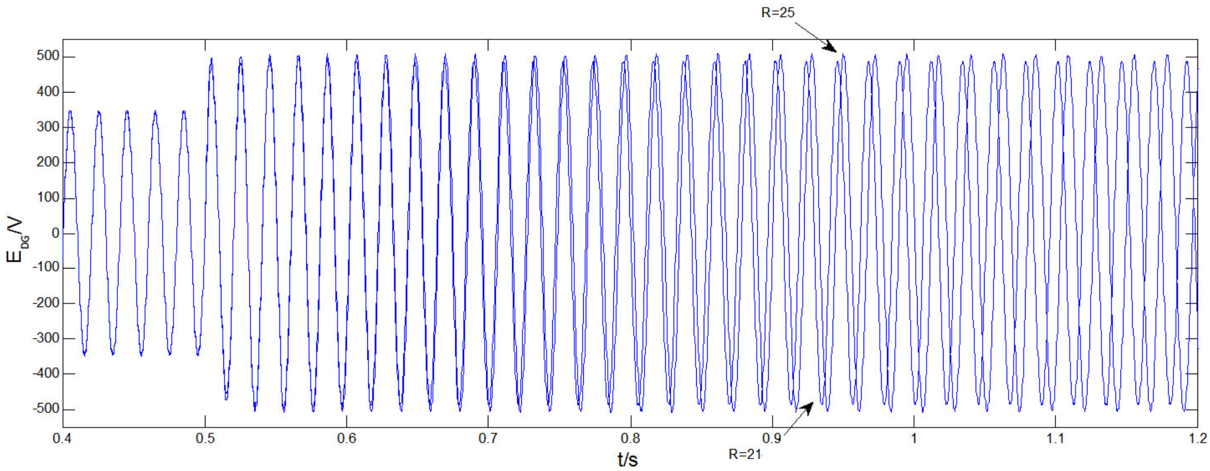

Figure 3. E_{DG} voltage (equivalent fault resistance = 21, resistance = 25 Ω)
图 3. E_{DG} 电压(等效故障阻抗 $R = 21$，$R = 25$ Ω)

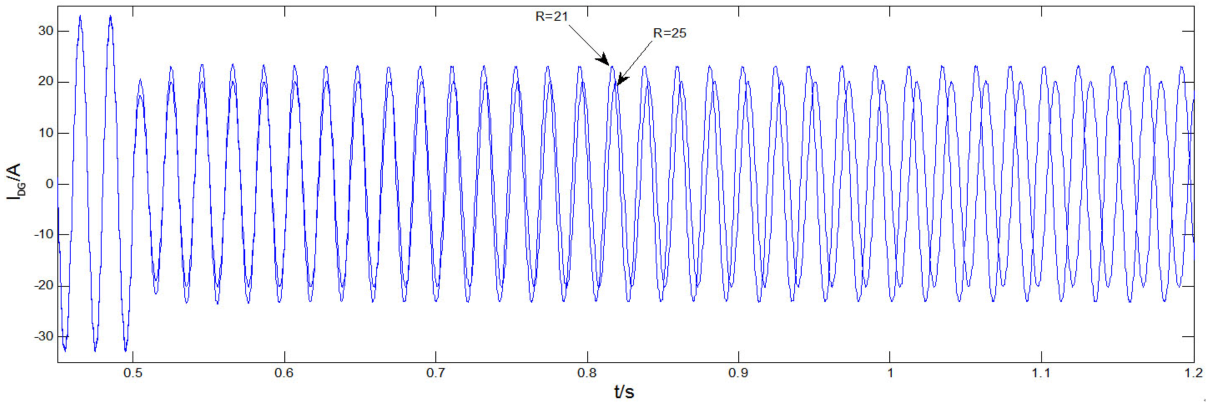

Figure 4. Inverter output current I_{DG} (equivalent fault $R = 21$, $R = 25$ Ω)
图 4. 逆变器输出电流 I_{DG} (等效故障阻抗 $R = 21$，$R = 25$ Ω)

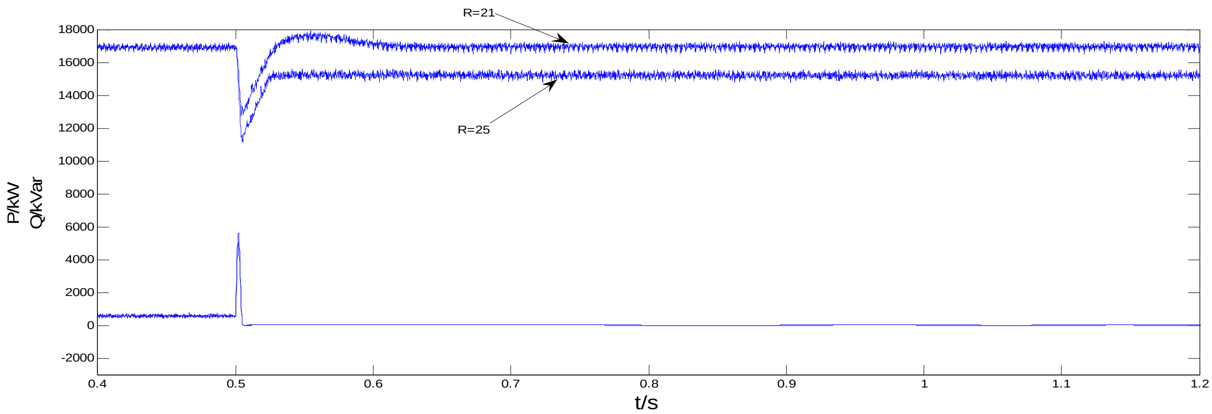

Figure 5. Inverter output power (equivalent fault $R = 21$, $R = 25$ Ω)
图 5. 逆变器输出功率(等效故障阻抗 $R = 21$，$R = 25$ Ω)

充当电压与频率的参考源。其结构如图 9 所示，其中参考频率信号 f 来自虚拟锁相环(PLL)，与系统频率 f 相比较通过积分环节获得参考相角信号 θ，并且结合参考电压 U_{ref} 给出电压参考值 U_{dref} 与 U_{qref}。经过带限幅的 PI 调节之后获得内环电流参考值，并通过最终改变正弦脉冲宽度调制系数，调节逆变器并网点的电压。

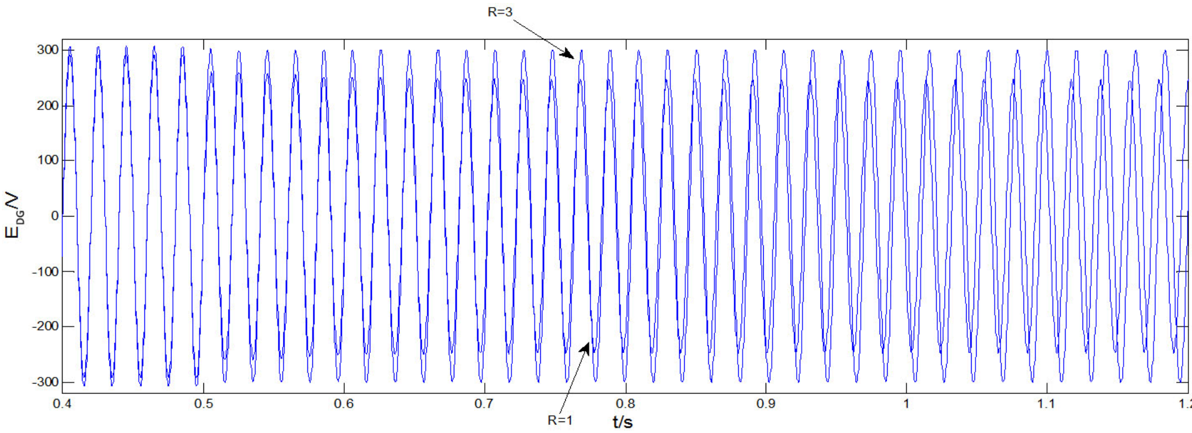

Figure 6. E_{DG} voltage (equivalent fault $R = 1$, $R = 3\ \Omega$)
图 6. E_{DG} 电压(等效故障阻抗 $R = 1$，$R = 3\ \Omega$)

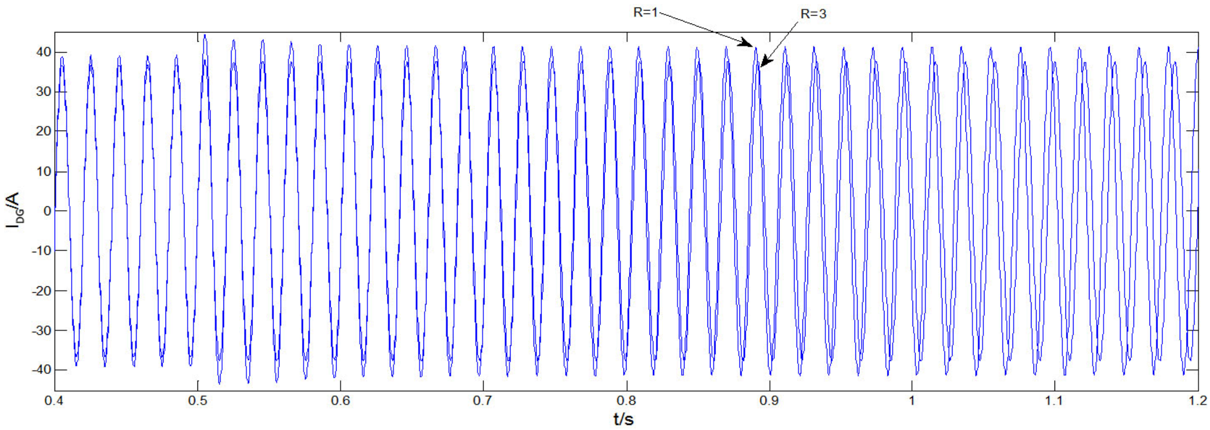

Figure 7. Inverter output current I_{DG} (equivalent fault $R = 1$, $R = 3\ \Omega$)
图 7. 逆变器输出电流 I_{DG} (等效故障阻抗 $R = 1$，$R = 3\ \Omega$)

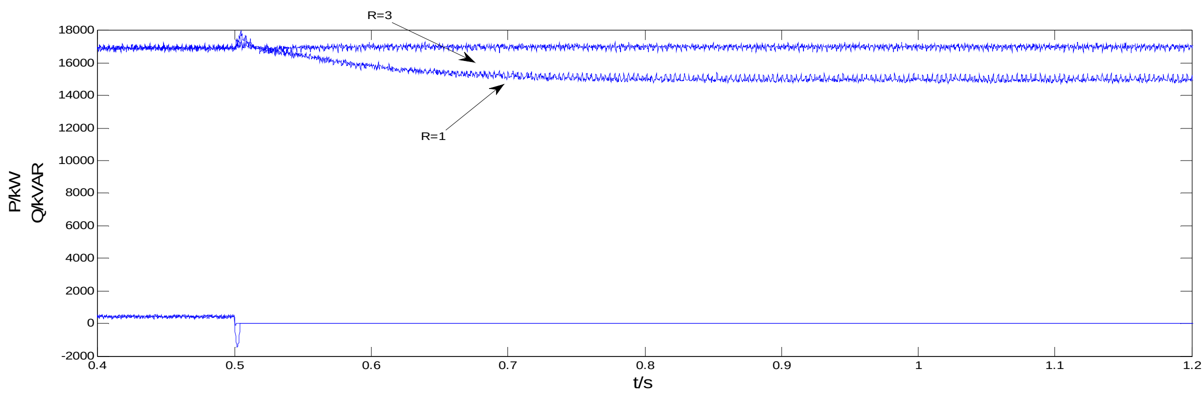

Figure 8. Inverter output power (equivalent fault $R = 1$, $R = 3\ \Omega$)
图 8. 逆变器输出功率(等效故障阻抗 $R = 1$，$R = 3\ \Omega$)

对于 VF 控制的逆变器，其输出基本特性仍然可以用公式(3)描述。上文已经指出 $\left|E_{DG}\right| = \frac{1}{2\sqrt{2}} \times P_m \times U_{DC}$，但所不同的是，由于 VF 控制的逆变器其作用是维持电压等于 U_{ref}，因此在发生故障的时候 E_{DG} 不会像 PQ 控制器一样达到 E_{DGMAX}，但是由于容量的限制逆变器也存在最大电流 $I_{vf\max}$。与 PQ 控制逆变器不同，

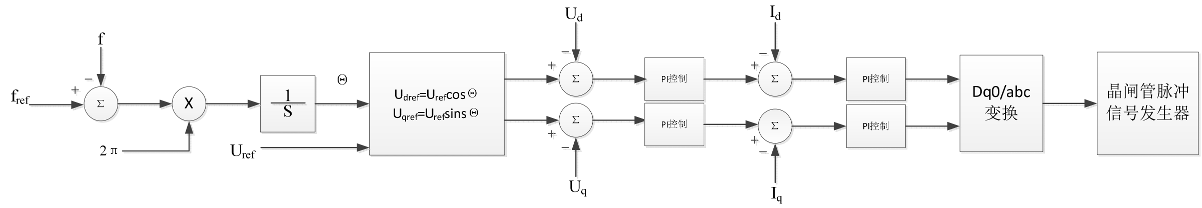

Figure 9. VF control principle
图 9. VF 控制原理

在稳定电压和频率的同时，VF 控制的 DG 输出的功率具有较大的波动性，可以在一定程度上补偿微电网的功率不平衡。而且对于确定容量上限的逆变电源其 $I_{vf\max}$ 往往也是可以确定的。VF 控制的逆变器输出特性分为两种状态：电压恒定状态与最大电流饱和状态。分别如公式(6)与公式(7)所示：

1) 电压恒定工作状态

$$\begin{cases} U_{DG} = E_{DG} - Z \times I_{DG} \\ I_{DG} = \dfrac{U_{DG}}{R} \\ I_{DG} \le I_{\mathrm{vf}\max} \\ U_{DG} = U_{ref} \end{cases} \tag{6}$$

当 DG 输出特性如公式(10)所示，则说明故障等效阻抗 R 比较大，故障电流未达到 DG 输出电流的极限，因此电压和频率都能够稳定与参考值。

2) 最大电流饱和状态

$$\begin{cases} U_{DG} = E_{DG} - Z \times I_{DG} \\ I_{DG} = \dfrac{U_{DG}}{R} \\ I_{DG} = I_{vf\max} \\ U_{DG} \le U_{ref} \end{cases} \tag{7}$$

由公式(7)可知，由于故障等效电阻 R 的进一步变小，导致 DG 输出的电流达到饱和，所以存在一个临界电阻 R_L，当 $R \gg R_L$ 是，$I_{DG} \ll I_{\max}$，若 $R < R_L$，则 $I_{DG} = I_{\max}$，$\dfrac{U_{DG}}{R} = I_{\max}$。因此 U_{DG} 会变小，同时由于 $E_{DG} = (Z + R) \times I_{vf\max}$，$E_{DG}$ 也会变小。一般而言发生此类故障的原因是，故障点接近逆变器出口侧，此时逆变器的输出电流达到控制的极限，无法实现整个微电网内部的功率平衡，会进一步导致微电网内部电压和频率偏离参考值，导致系统无法正常运行。

基于电力系统仿真软件 PSCAD/EMTDC，参照 图 10，搭建了一个的简单仿真模型。其中微电网正常工作电压为 311 V，直流侧的电压 $U_{DC} = 750$ V，滤波电路的电感 $L = 2$ mH，滤波电容 $C = 10$ uF，线路发生故障后的等效阻抗 R 为分别为 10 Ω，8 Ω 与 2 Ω，。参见 图 11 与 图 12 可见，在 1 秒的时候发生三相短路故障。

从 图 11 可以看出在故障发生之前，电压都稳定在正常值 311V，而在 1 秒发生故障之后 $R = 2$ Ω，$R = 8$ Ω 的线路出口侧电压 E_{DG} 与 DG 并网点电压 U_{DG} 都减小，同时等效电阻 R 越小，电压跌落越多。而 $R = 10$ Ω 的线路电压没有发生跌落。从 图 12 可以看出 $R = 2$ Ω，$R = 8$ Ω 的线路输出电流经过 PI 暂态积累调解的过程之后最终重合，达到了饱和电流 $I_{vf\max}$，而 $R = 10$ Ω 的线路，虽然电流也有变大，但是最终输出电流并没有达到饱和电流 $I_{vf\max}$，因此以电流 I_{DG} 是否饱和，以及 U_{DG}，E_{DG} 是否跌落作为区分 VF 控制的 DG 所处的工作状态的边界条件是有效与合理的。

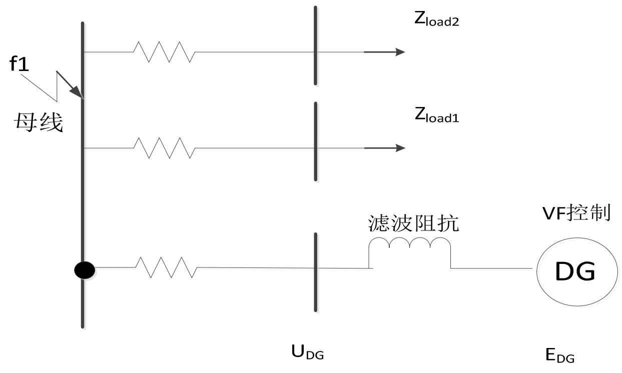

Figure 10. VF control structure diagram
图 10. VF 控制结构图

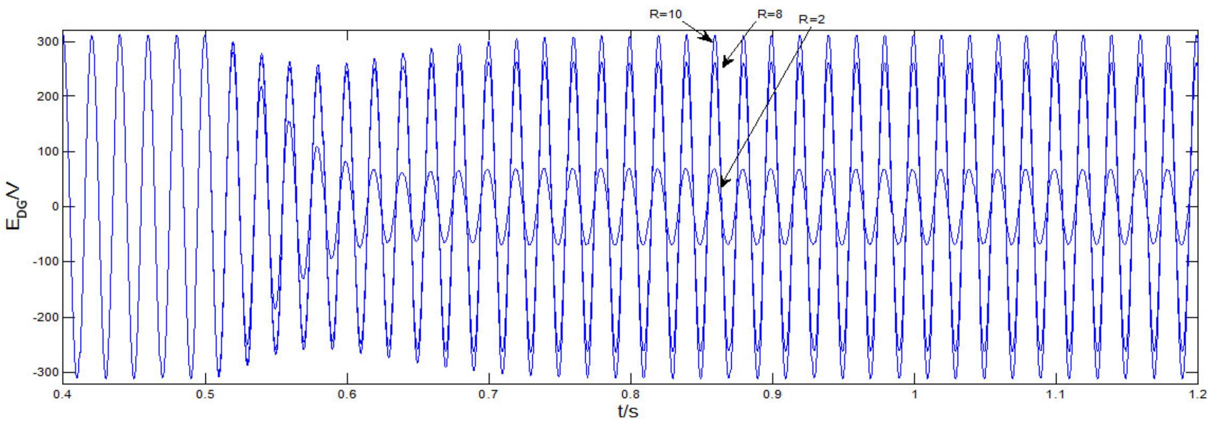

Figure 11. E_{DG} voltage of VF control (equivalent fault $R = 10$, $R = 8\ \Omega$, $R = 2\ \Omega$)
图 11. VF 控制下 E_{DG} 电压(等效故障阻抗 $R = 10$，$R = 8\ \Omega$，$R = 2\ \Omega$)

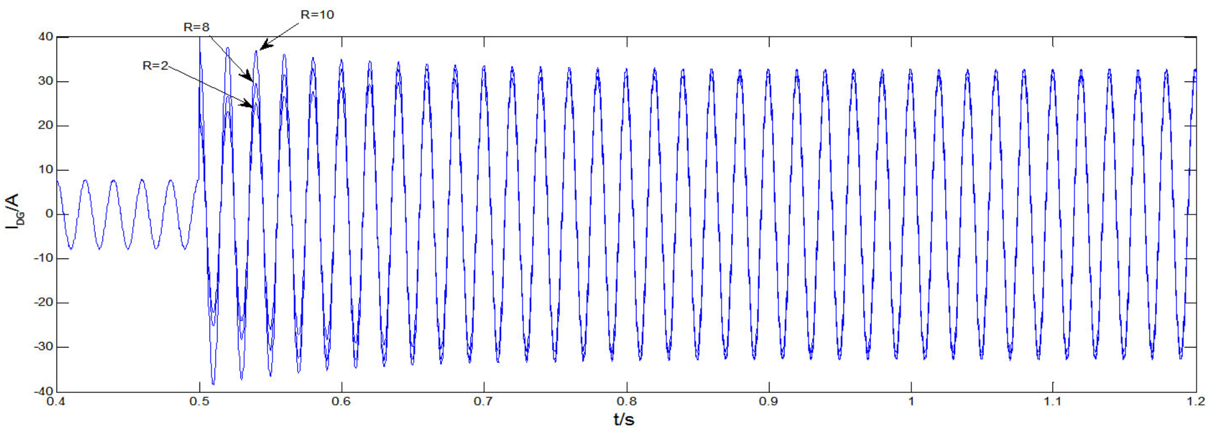

Figure 12. Inverter output current I_{DG} of VF control (equivalent fault $R = 10$, $R = 8\ \Omega$, $R = 2\ \Omega$)
图 12. VF 控制逆变器输出电流 I_{DG} (等效故障阻抗 $R = 10$，$R = 8\ \Omega$，$R = 2\ \Omega$)

3. DG 的三相短路故障分析与验证

前面分析了只含有 1 种控制方式的 DG 在发生故障时候的特性，这一节将考虑有 VF 与 PQ 控制 DG 在孤岛运行时，发生故障下的综合特性。

在发生故障时候，故障分析与故障发生点的位置有关。根据图 13 可以得到公式(8)。

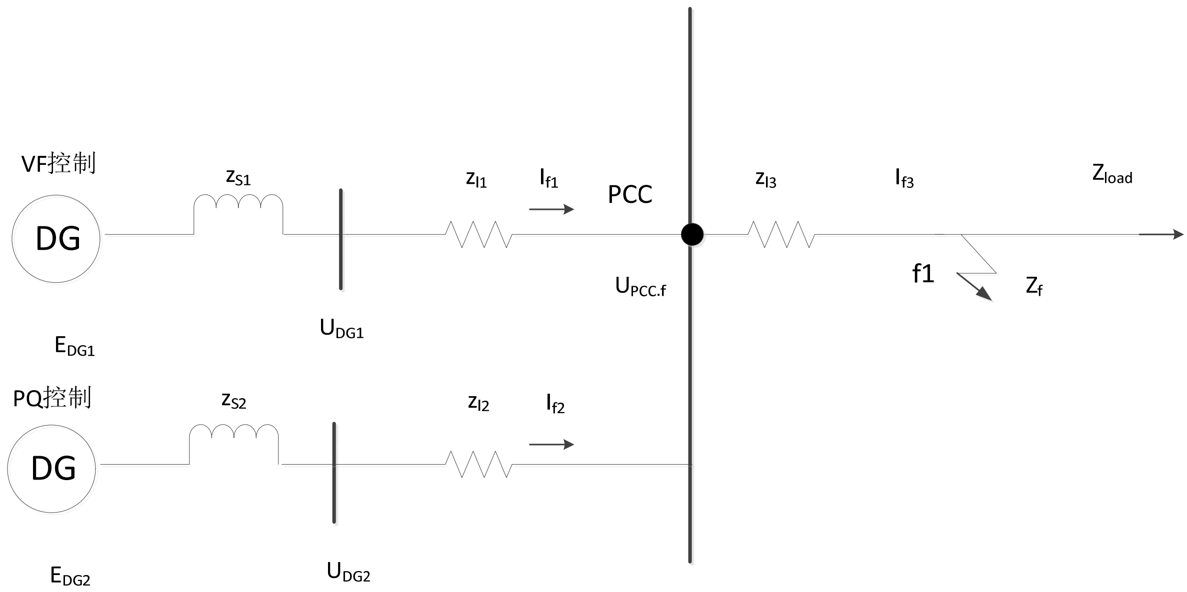

Figure 13. Isolated island operation microgrid
图 13. 孤岛运行微电网

$$\begin{cases} U_{PCC.f} = \left(Z_f \mathbin{//} Z_{load} + Z_{l3}\right) \times I_{l3} \\ I_{f3} = I_{f1} + I_{f2} \end{cases} \tag{8}$$

如图 13 所示，在微电网线负载侧发生三相短路故障。Z_{S1} 和 Z_{S2} 是等效滤波阻抗，Z_{l1}，Z_{l2} 与 Z_{l3} 是等效线路阻抗，故障发生时候的等效阻抗为 Z_f。尽管由于孤岛运行系统没有大电网的支持，但是由于 VF 控制的 DG 对与整个系统的输出电压与频率有支撑作用，因此 PQ 控制与 VF 控制 DG 只能处于以下三种工作状态。

1) VF 控制 DG 能够稳定电压，PQ 控制 DG 能稳定输出额定功率，此时可根据公式(2)，公式(3)，公式(6)与公式(8)求解故障电路。

2) VF 控制 DG 不能够稳定电压，处于电流饱和状态，PQ 控制 DG 能稳定输出额定功率，此时可根据公式(5)，公式(7)与公式(8)求解故障电路。

3) VF 控制 DG 与 PQ 控制 DG 都处于电流饱和状态，此时可根据公式(5)，公式(7)以及公式(8)求解故障电路。

4. 算例验证

为了验证特性方程的合理性，利用 PSCAD/EMTDC 软件按照图 13 的结构搭建了 1 个仿真系统。其中 VF 控制 DG 的参考电压为 311V，PQ 控制 DG 的参考功率 $P_{ref} = 20$ kW，$Q_{ref} = 0$ kVar。滤波电路电感 L = 2 mH，滤波电容 C = 10 uF，等效线路阻抗 $Z_{l1} = 0.2568 + j0.0326\ \Omega$，$Z_{l2} = 0.1284 + j0.0163\ \Omega$，$Z_{l3} = 0.4971 + j0.0565\ \Omega$，$I_{\max 1} = I_{\max 2} = 50$ A。故障发生时的等效故障阻抗 Z_f = 3Ω 以及 5 Ω，结果如表 1 与表 2 所示。

从表 1 可以看出，当 $Z_f = 3\ \Omega$，VF 控制的 DG 输出电流已经达到饱和状态状态，因此其无法稳定电压，进而导致了 U_{DG1} 小于参考值，而表 2 当 Z_f = 5 Ω，VF 控制的输出电流小于 $I_{\max 1}$，因此可以维持电压的稳定。由于精确的给出了包括 DG 电压 U_d 与 U_q,输出电流 I_d 与 I_q 分量的计算公式，因此可以计算包括相角在内的各个数值，并且仿真值与计算值的误差都小于 3%。因此上述结果可以证明本文所推导的微电网运行分析方法，可以在考虑 DG 控制策略的前提下，有效分析故障下电路状态。

Table 1. Fault analysis results in microgrid (three-phase short circuit resistance $Z_f = 3\ \Omega$)
表 1. 当 $Z_f = 3\ \Omega$ 的微电网故障分析

	I_{l1}	I_{l2}	I_{l3}	$U_{PCC.f}$	U_{DG1}	U_{DG2}	E_{DG1}	E_{DG2}
计算值	50.00∠−2.19	48.31∠−0.72	98.00∠−1.46	246.10∠−0.00	259.11∠0.17	251.22∠0.33	259.3∠0.20	251.14∠0.27
仿真值	49.7∠−2.19	48.27∠−0.71	97.80∠−1.45	245.77∠−0.00	260.01∠0.18	253.1∠0.28	259.4∠0.13	251.9∠0.30

Table 2. Fault analysis results in microgrid (three-phase short circuit resistance $Z_f = 5\ \Omega$)
表 2. 当 $Z_f = 5\ \Omega$ 的微电网故障分析

	I_{l1}	I_{l2}	I_{l3}	$U_{PCC.f}$	U_{DG1}	U_{DG2}	E_{DG1}	E_{DG2}
计算值	47.36∠−1.31	44.34∠−1.18	91.74∠−1.23	299.84∠−0.00	309.9∠0.22	305.17∠0.11	310.5∠0.29	305.17∠0.11
仿真值	47.42∠−1.28	44.19∠−1.24	91.78∠−1.21	301.48∠−0.00	313.66∠0.22	307.12∠0.12	313.7∠0.18	308.23∠0.09

5. 结论

本文基于对 PQ 与 VF 控制 DG 的输出特性的分析，提出了故障状态分析模型，以及不同故障状态下的边界条件，主要体现在以下 4 个方面：

1) 对于采用 PQ 控制的 DG，在输出状态随着故障等效电阻 R 的不同，以 DG 最大输出电压 E_{DGMAX} 与最大输出电流 I_{MAX}，以及参考功率 P_{ref} 和 Q_{ref} 作为划分故障状态的边界条件。当处于最大输出电压或者最大输出电流状态时，则输出功率无法保证。

2) 对于采用 VF 控制的 DG，由于有参考电压的钳制，因此与 PQ 控制不同，只存有电压恒定于参考值状态，或者电流饱和状态，因此以 U_{ref} 和 I_{MAX}，作为划分故障的边界条件。当处于电流饱和状态时，则系统的电压和频率将无法稳定。

3) 基于上述关于 DG 控制策略的故障特性分析，通过进行数学推导和特性方程的建立即可以从理论上计算出故障时的状态变量，而基于 PSCAD/EMTDC 的仿真则证明本文所分析的方法的正确性。

4) 微电网系统由于电流存在双向流动，而且是多个控制系统的互相耦合，因此分析较为复杂。本文所推导的关于 PQ 控制与 VF 控制逆变器的故障特性分析，在理清各个控制策略对于微电网系统影响的同时，将会有助于微电网系统继电保护研究与分析。

参考文献 (References)

[1] 王成山，武震，李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.

[2] Davis, G. (2003) Concept of Microgird. Consultant of Reports of CERTS Progam Office Lawrence Berkeley National Laboratory.

[3] Peas Lopes, J.A., Moreira, C.L. and Madureira, A.G. (2005) Defining Control Strategies for Analysing Microgrids Islanded Operation. 2005 *IEEE Russia Power Tech*, St. Petersburg, 27-30 June 2005, 1-7.

[4] 王成山，孙晓倩. 含分布式电源配电网短路计算的改进方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 54-58.

[5] 贾清泉，孙玲玲，王美娟，杨威. 基于节点搜索的微电网自适应保护方法[J]. 中国电机工程学报，2014(10): 1650-1657.

[6] 王守相，江兴月，王成山. 含分布式电源的配电网故障分析叠加法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 38-42.

[7] 吴争荣，王钢，李海锋，潘国清，高翔. 计及逆变型分布式电源控制特性的配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 92-96+108.

[8] 吴争荣，王钢，李海锋，潘国清，高翔. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报，2013, 33(1): 130-136.

[9] 潘国清. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析[D]: [硕士学位论文]. 广州：华南理工大学, 2014.

[10] Barsali, S., Ceraolo, M., Pelacchi, P. and Poli, D. (2002) Control Techniques of Dispersed Generators to Improve the Continuity of Electricity Supply. 2002 *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, **2**, 789-794. http://dx.doi.org/10.1109/PESW.2002.985115

[11] 曾德辉, 潘国清, 王钢, 朱革兰, 蔡颖倩. 含 V/f 控制 DG 的微电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014(16): 2604-2611.

[12] 李中洲. 含逆变电源微电网的稳态故障分析研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.