

基于逆变器控制策略的微电网故障分析

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 210042)

[摘要] 本文针对微电网故障问题,通过分析 PQ 和 VF 控制策略的逆变器运行特性,建立了基于逆变器控制策略的数学分析等值模型,提出了故障状态边界条件.结合微电网孤岛运行时的特点,利用故障前后的节点电压和节点电流,推导出微电网处于孤岛运行状态并发生三相短路故障时,公共耦合节点(PCC)处的电压与电流求解方程,建立了较为精确的故障分析方法.最后利用 PSCAD 建立了 220 V 低压微电网的仿真系统,验证了所述方法的正确性.

[关键词] 微电网, 孤岛运行, 逆变器控制策略, 等值模型, 数值分析

[中图分类号] TM71 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)03-0001-09

Fault Analysis of Micro-Grid Based on Inverter Control Strategy

Jiang Junjie, Ju Rong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Aiming at the problem of micro-grid faults, this paper by analyzing the operating characteristics of the inverter controlled by PQ and VF develops an equivalent mathematical model based on the inverter control strategy, and gives the boundary condition of fault state. The work characteristics of the micro-grid island operation is considered by using the node voltage and node current before and after fault state, derived the equation of voltage and current at PCC (point of common coupling), and a more precise analysis method is established when the system is in three phase short circuit fault. At last, by using the PSCAD, a simulation system of isolated island operation of low voltage of 220 V is built, and the validity of the proposed method is tested.

Key words: micro-grid, isolated island operation, inverter control strategy, equivalent model, mathematical analysis

近年来,以分布式能源为基础,能够进行并网运行以及孤岛运行的微电网系统,凭借其智能化的控制与运行特点逐渐成为了国内外的研究新方向^[1-5].

当微电网处于并网运行时,分布式能源主要采用有功与无功控制(PQ)控制,目前对于 PQ 控制的分布式发电(Distributed Generation, DG)的等值模型,已经有不少学者作了大量的研究.文献[6]根据正常状态时的逆变器控制策略将微电网划分为不同的节点,利用前推回带法求解故障电压与电流.文献[7-8]考虑了并网故障穿越时的补偿控制策略,将 DG 等效为压控电流源模型,指出其存在饱和电流 I_{\max} ,并且分析了对称与不对称短路故障下的电路特性,但是并未考虑 DG 电压饱和特性.

当配电网发生故障等意外情况时,微电网会进入孤岛运行模式,由一个分布式能源或者储能装置采用电压频率(VF)控制作为主控制器,向微电网中分布式能源给予电压和频率支持,而其他分布式能源则继续采用 PQ 控制输出稳定的功率.文献[9-10]指出大多数 DG 采用电压型的并网逆变器,其直流侧往往配有大电容,在故障的时候直流侧电压不会产生变化,因此在分析其故障情况时主要考虑逆变器的控制策略.文献[11]提出了 VF 控制 DG 的电压饱和特性数学模型,但没有考虑电流饱和限制.

本文在前人的基础上对于 PQ 和 VF 控制 DG 的工作特性进行系统研究,利用数学分析方法,推导了 PQ 控制 DG 存在电压和电流两种饱和状态;VF 控制 DG 存在恒压与电流饱和两种状态.并且分析了各

个状态下的边界条件. 利用 PSCAD/EMTDC 建立仿真模型, 模拟在并网与孤岛运行时发生三相短路故障下的电路暂态特性, 求解故障下的电压与电流. 通过建立仿真模型, 验证了本文所提出的方法的有效性.

1 PQ控制逆变器故障特性与等值模型

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. 文献[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.

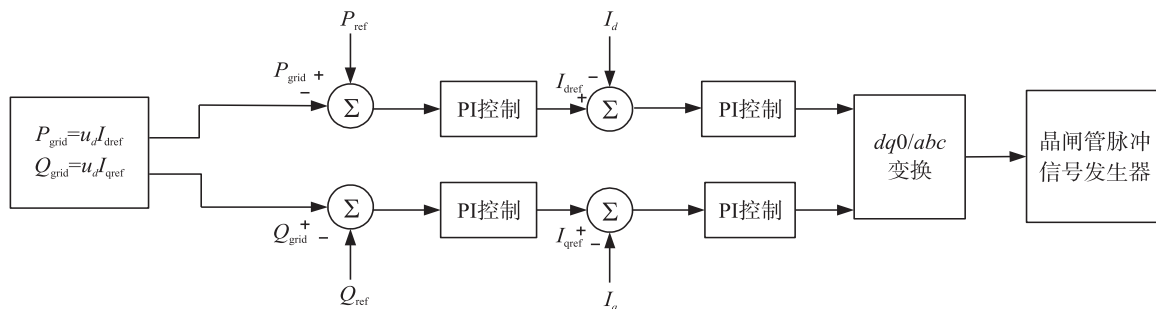


图1 PO控制原理

Fig.1 PQ control principle

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. 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. $P_{\text{grid}}, Q_{\text{grid}}, P_{\text{ref}}$ 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.

$$\begin{cases} P = u_d \times i_d + u_q \times i_q, \\ Q = -u_d \times i_q + u_q \times i_d, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_{\text{dref}} = P_{\text{ref}} \div u_d, \\ I_{\text{dref}} = -Q_{\text{ref}} \div u_d. \end{cases} \quad (2)$$

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,都对 DG 的输出有较大影响.如图 2 所示,若上级电网系统发生故障进入意外孤岛运行,在 f_1 处断线,此时 DG 将失去大电网的支持,如果没有 VF 控制逆变器支撑或者 VF 控制逆变器没有正常工作,系统将进入意外孤岛状态.

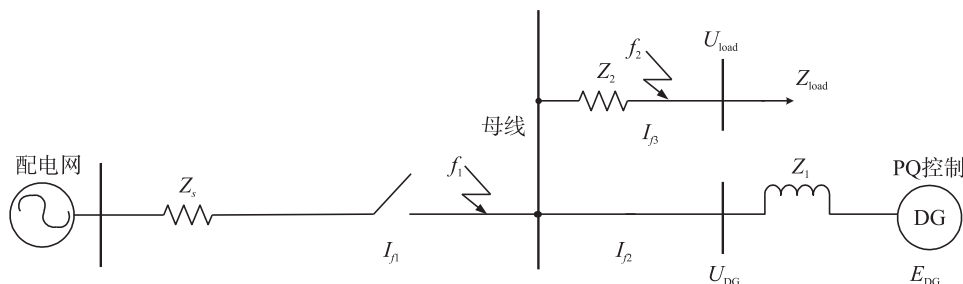


图2 PQ控制结构图

Fig.2 Structure diagram of PQ control

U_{DG} 为逆变器并网点处的电压; E_{DG} 为逆变器出口侧的电压; U_{load} 为负荷侧电压; I_{DG} 为逆变器输出电流; Z_s 为配电网等效线路阻抗; Z_1 为逆变器出口侧等效阻抗; Z_2 为负荷侧线路等效阻抗; Z_{load} 为负荷等效阻抗; Z_f 为故障下的等效阻抗. 根据图 2 可得式(3):

$$\begin{cases} U_{\text{DG}} = E_{\text{DG}} - Z_1 \times I_{\text{DG}} , \\ I_{\text{DG}} = \frac{U_{\text{DG}}}{Z_f} . \end{cases} \quad (3)$$

在分布式微电网发电系统中,风能、光伏等新能源的能量变化往往具有一定的惯性,并且在正常工作

时为实现能源的有效使用 Q_{ref} 一般为 0, 因此可以认为故障前后的有功功率输出功率 $P_{\text{ref}}=P_{\text{grid}}$, $Q_{\text{ref}}=Q_{\text{grid}}=0$. 因此可得 $U_{\text{DG}} = \sqrt{P_{\text{ref}} \times Z_f}$.

$$E_{\text{DG}} = \left(\frac{Z_1}{Z_f} + 1 \right) \times \sqrt{P_{\text{ref}} \times Z_f}, \quad (4)$$

如式(4)所示, 由于在故障条件下 Z_1 和 P_{ref} 不会发生改变. 显然 $\left(\frac{Z_1}{Z_f} + 1 \right) > 1$, 因此故障下的线路等效阻抗 Z_f 和 E_{DG} 正相关. 由于 DG 采用正弦脉冲宽度调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM), 因此 E_{DG} 是由 SPWM 调制系数 P_m 和逆变器直流侧的电压 U_{DG} 共同决定, 如式(5)所示, 其中 $P_{\text{mmin}}=-1, P_{\text{mmax}}=1$.

$$|E_{\text{DG}}| = \frac{1}{2\sqrt{2}} \times P_m \times U_{\text{DG}}, \quad (5)$$

若 $|P_m|=1$, 则此时 $E_{\text{DGmax}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \times U_{\text{DG}}$, DG 输出功率达到饱和状态. 当 f_1 点发生故障, 微电网系统将失去上级电网的支撑. 根据系统所接负荷的等效阻抗不同, Z_f 将会发生变化, 由上可知 $U_{\text{DG}} = \sqrt{P_{\text{ref}} \times Z_f}$, 因此 Z_f 与 U_{DG} 成正相关. 由于 DG 采用电压电流双闭环控制, 存在电压幅值限制 U_{DGmax} , 并网点电压 U_{DG} 不会一直变大, 因此 PQ 控制 DG 会进入电压饱和状态, 如式(6)、(7)所示

$$Z_{fu\text{max}} = \frac{U_{\text{DGmax}}^2}{P_{\text{ref}}}. \quad (6)$$

$$\begin{cases} Z_{fu\text{max}} < Z_f, \\ E_{\text{DG}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} U_{\text{DG}}, \\ E_{\text{DG}} - I_{\text{DG}} \times Z_l = U_{\text{DG}}, \\ I_{\text{DG}} = \frac{U_{\text{DG}}}{Z_f}, \\ I_{\text{qref}} = -\frac{Q_{\text{ref}}}{U_d}, \\ I_{\text{dref}} = \sqrt{I_{\text{DG}}^2 - I_{\text{qref}}^2}, \\ \arctan \theta = \frac{I_{\text{qref}}}{I_{\text{dref}}}. \end{cases} \quad (7)$$

微电网进入电压饱和运行模式的特性方程如式(7)所示. $Z_{fu\text{max}}$ 称为电压饱和阻抗, 当 $Z_{fu\text{max}}=Z_f$ 时, 由于电压幅值限制无法进一步变大, 所以出口侧电压 E_{DG} 与并网点电压 U_{DG} 都达到了最大值. 当 $Z_{fu\text{max}}>Z_f$ 时, 根据式(7)所示, 逆变器出口侧的电流 I_{DG} 会减小, 最终导致输出功率无法跟随参考值而变小.

为了验证式(7)的正确性, 利用 PSCAD 软件, 搭建了一个如图 2 的微电网并网运行系统, 其中系统电压等级为 220 V; PQ 控制逆变器输出功率 $S=20+j0$ kVA; $U_{\text{DG}}=1000$ V; 电路的电感 $L=2$ mH; 滤波电容; $C=10$ μ F; $Z_1=0.26+j0.33$ Ω ; $Z_2=0.5121+j0.66$ Ω ; $Z_{\text{load1}}=20.13+j0.02$ Ω ; $Z_{\text{load2}}=19.37+j0.01$ Ω ; 系统在 0.3 s 进入意外孤岛状态.

如图 3 所示, 当负载变大时, 电流将会降低, 无法稳定与功率参考值, 最终导致系统的输出功率降低. 如图 4 所示, 当 $Z_{\text{load}}=Z_{\text{load1}}$ 时输出电压达到饱, 此时 E_{DG} 的峰值为 500 V, 正好符合式(5)推导. 如图 5 所示, 当电压饱和时输电电流下降. 因为 PI 调节的累计饱和存在固有延时, 因此系统的电压、电流、功率都经过了一定的延迟才趋于稳定.

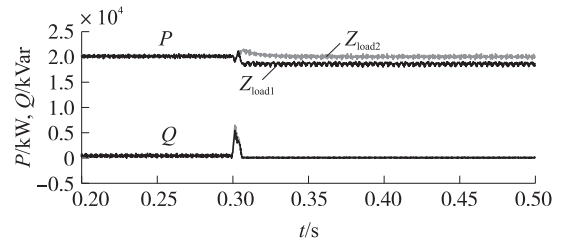
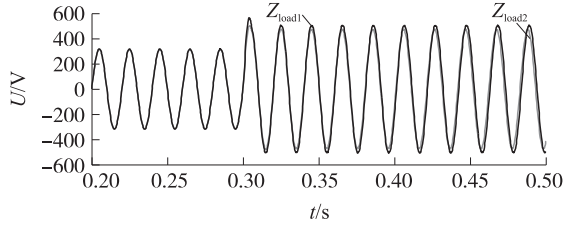
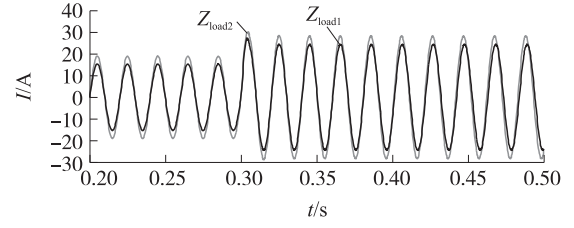


图3 电压饱和状态下的PQ输出功率

Fig.3 PQ output power under voltage saturation

图4 电压饱和状态下的逆变器电压 E_{DG} Fig.4 Inverter voltage E_{DG} under voltage saturation图5 电压饱和状态下的逆变器输出电流 I_{DG} Fig.5 Inverter output current I_{DG} under voltage saturation

结合式(7)即可计算出在不同负荷条件下,系统进入意外孤岛运行时的各项数据,如表1、表2所示.仿真值与计算值相比而言,误差较小,因此上文推导的公式可以较为精确的描述 PQ 控制器在电压饱和下的故障情况.

表1 $Z_{load1}=20.13+j0.02 \Omega$ 时系统分析结果Table 1 System analysis results while $Z_{load1}=20.13+j0.02 \Omega$

	E_{DG}/V	U_{DG}/V	U_{load}/V	I_{DG}/A
仿真值	$353.55 \angle 0.00$	$352.12 \angle -0.21$	$343.65 \angle -0.36$	$17.11 \angle -0.51$
计算值	$352.47 \angle 0.00$	$351.89 \angle -0.23$	$342.7 \angle -0.4$	$17.08 \angle -0.49$

表2 $Z_{load2}=18.37+j0.01 \Omega$ 时系统分析结果Table 2 System analysis results while $Z_{load2}=18.37+j0.01 \Omega$

	E_{DG}/V	U_{DG}/V	U_{load}/V	I_{DG}/A
仿真值	$332.00 \angle 0.00$	$330.912 \angle -0.23$	$322.295 \angle -0.52$	$19.876 \angle -0.64$
计算值	$332.21 \angle 0.00$	$331.002 \angle -0.25$	$322.277 \angle -0.56$	$18.432 \angle -0.61$

若 f_2 处发生短路,则此时微电网系统仍能得到上级电网的支持.由于发生短路故障,因此 Z_f 为变小.根据式(4)可知 E_{DG} 与 U_{DG} 会一同减小,系统的实际有功功率 P_{grid} 输出会一并减少.因此 $P_{ref}-P_{grid}$ 会增加,因此可得式(8):

$$I_{dref} = \frac{P_{ref} - P_{grid}}{u_d}. \quad (8)$$

逆变器电流 d 轴分量 I_{dref} 将会变大,并最终导致逆变器输出电流 I_{DG} 变大.但是由于 DG 中电力电子元件的容量以及元件耐压承受能力,在双闭环调节的过程中会对最大电流进行限制,因此 I_{DG} 存在饱和输出电流 I_{max} ,可得式(9):

$$I_{max} = \frac{P_{ref}}{Z_{fi max}}. \quad (9)$$

存在电流饱和阻抗 $Z_{fi max}$, $Z_{fi max}=Z_f$ 时逆变器输出电流处于临界饱和状态,随着短路故障发生点的位置不同,导致 $Z_{fi max}>Z_f$ 时,由于电流环的钳制作用 $I_{DG}=I_{max}$, DG 输出功率将会减少.因此根据故障位置的不同, PQ 逆变器的输出特性可以用式(10)与式(11)进行描述.

$$\begin{cases} Z_{fi max} \leq Z_f \leq Z_{fu max}, \\ I_{dref} = \frac{P_{ref}}{u_d}, \\ I_{qref} = -\frac{Q_{ref}}{u_d}, \\ \arctan \theta = \frac{I_{qref}}{I_{dref}}, \\ I_{DG} = \sqrt{I_{dref}^2 + I_{qref}^2}, \\ E_{DG} - I_{DG} \times Z_1 = U_{DG}. \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} Z_f < Z_{fi \max}, \\ I_{DG} = I_{\max}, \\ I_{qref} = -\frac{Q_{ref}}{U_d}, \\ I_{dref} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_{qref}^2}, \\ \arctan \theta = \frac{I_{qref}}{I_{dref}}, \\ E_{DG} - I_{DG} \times Z_l = U_{DG}. \end{cases} \quad (11)$$

当 $Z_{fi \max} \leq Z_f \leq Z_{fu \max}$, DG 的运行状态与正常工作时一致,此时 DG 输出特性如式(10)所示.若随着故障的位置发生改变导致 $Z_f < Z_{fi \max}$,会导致 DG 输出电流达到饱和并最终导致输出功率无法稳定与参考值,此时 DG 的输出特性如式(11)所示,输出功率将会变小.

为了验证公式的准确性,利用 PSCAD,如图 2,搭建了仿真模型,在 0.3 s 时,在 f_2 处发生三相短路故障,其中系统电压等级为 220 V;PQ 控制逆变器输出功率 $S=20+j0$ kVA; $U_{DG}=1000$ V;电路的电感 $L=2$ mH;滤波电容; $C=10$ μ F; $Z_1=0.26+j0.33$ Ω ; $Z_2=0.5121+j0.66$ Ω ; $Z_{load}=19.37+j0.01$ Ω ;故障时的过渡阻抗阻抗分别为 $Z_{f1}=1$ Ω 、 $Z_{f2}=0$ Ω .

如图 6 所示,当发生短路故障导时,若 $Z_{fi \max} \leq Z_f \leq Z_{fu \max}$,此时 DG 仍能稳定输出功率,但线路等效故障阻抗进一步变小时,PQ 控制逆变器的输出功率无法稳定并且将会变小.如图 7 所示,随着故障时的过渡阻抗阻抗变小,逆变器电压 E_{DG} 会一并减小,且故障过渡阻抗越小, E_{DG} 也越小.如图 8 所示,随着线路等效阻抗的变小,DG 输出电流 I_{DG} 会变大并最终稳定于饱和值 I_{\max} .

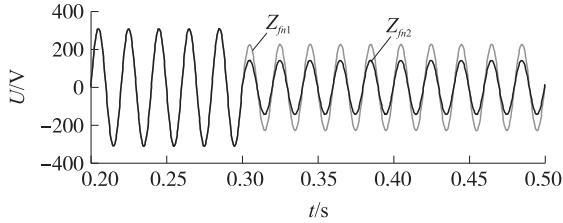


图7 电流和状态下的逆变器电压 E_{DG}

Fig.7 Inverter voltage E_{DG} under current saturation

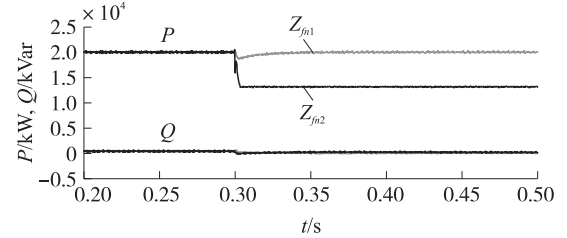


图6 电流饱和状态下的功率输出

Fig.6 Output power under current saturation

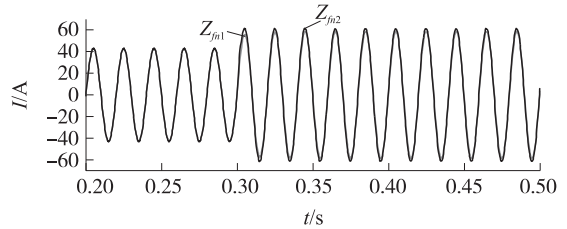


图8 电流饱和状态下的逆变器输出电流 I_{DG}

Fig.5 Inverter output current I_{DG} under current saturation

结合式(10)、(11)可以对 PQ 控制 DG 在 f_2 处发生三相短路故障下的电压、电流、功率进行定量分析.结果如表 3、表 4 所示,系统仿真值与计算值接近,偏差不超过 1%.因此,本节推导的公式可以用来较为精确的分析 PQ 控制逆变器在电流饱和状态下的故障特性,并且可以用来分析故障下的 PQ 控制逆变器输出功率.

表3 $Z_{f1}=1$ Ω 时系统分析结果

Table 3 System analysis results while $Z_{f1}=1$ Ω

	E_{DG}/V	U_{DG}/V	I_{DG}/A	$S=P+jQ/kVA$
仿真值	160.51 \angle 0.00	159.81 \angle -0.37	41.31 \angle -0.93	20.07+j1.21
计算值	160.07 \angle 0.00	157.21 \angle -0.31	41.39 \angle -1.01	20.00+j0.00

表4 $Z_{f2}=0$ Ω 时系统分析结果

Table 4 System analysis results while $Z_{f2}=0$ Ω

	E_{DG}/V	U_{DG}/V	I_{DG}/A	$S=P+jQ/kVA$
仿真值	100.76 \angle 0.00	99.68 \angle -0.27	43.13 \angle -0.87	13.37+j1.03
计算值	101.21 \angle 0.00	98.91 \angle -0.29	42.83 \angle -0.92	13.21+j1.32

2 VF控制逆变器故障特性与等值模型

VF控制也称为恒压-恒频控制,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,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 来自锁相环,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.

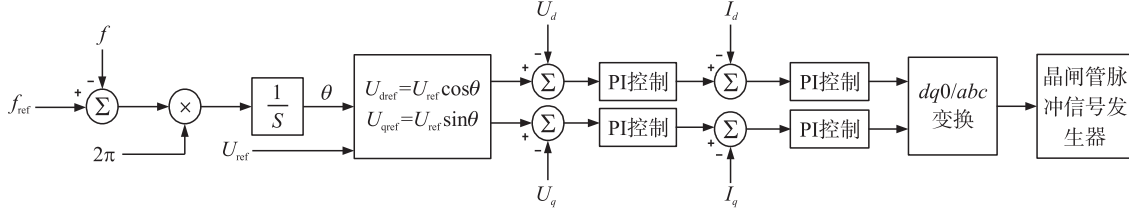


图9 VF控制原理

Fig.9 VF control principle

对于VF控制DG,部分输出特性仍可用式(3)、(5)表示.式(5)已经指出,由于SPWM调制系数的限制,DG出口侧电压 $|E_{DG}| = \frac{1}{2\sqrt{2}} \times P_m \times U_{DC}$.但与PQ控制DG不同,由于VF控制DG的作用是维持微电网系统电压等于电压参考值 U_{ref} ,一般来说远小于 $|E_{DGmax}| = \frac{1}{2\sqrt{2}} \times U_{DC}$,因此VF控制DG不会出现电压饱和.为了满足系统功率平衡,VF控制DG在稳定系统频率与电压的同时输出电流变化较大,但与PQ控制逆变器一样,由于容量的限制,存在最大输出电流 I_{VFmax} .因此VF控制DG有电压恒定工作状态以及电流饱和工作状态.

$$\begin{cases} I_{DG} < I_{VFmax}, \\ U_{DG} = U_{ref}, \\ E_{DG} - I_{DG} \times Z_l = U_{DG}, \\ I_{DG} = \frac{U_{DG}}{Z_f}. \end{cases} \quad (12)$$

如上式, E_{DG} 为逆变器并网点电压; U_{DG} 为逆变器并网点电压; U_{ref} 为电压参考值; I_{DG} 为逆变器输出电流; I_{VFmax} 为逆变器饱和电流; Z_l 为逆变器滤波阻抗; Z_f 为系统等效故障阻抗.当微电网的功率缺额在VF控制的DG补偿容量范围之内时,DG输出特性如式(12)所示.一般来说,此时故障发生点位置离VF控制的DG位置较远,因此故障等效阻抗 Z_f 较大,所以DG输出电流未达到饱和,频率与电压都能够稳定于参考值.

若故障位置的发生改变,导致 Z_f 进一步变小,由式(12)可知,输出电流 I_{DG} 会变大并且最终达到饱和和电流 I_{VFmax} ,此时存在临界故障等效阻抗 Z_{VFmax} .当 $Z_{VFmax} < Z_f$ 时, $I_{DG} < I_{VFmax}$.若 $Z_{VFmax} > Z_f$ 时, I_{DG} 会因为电流饱和和限制无法进一步变大,最终稳定于饱和值 I_{VFmax} ,此时为了满足 $\frac{U_{DG}}{Z_f} = I_{VFmax}$, U_{DG} 会减小.由于 $E_{DG} = (Z_l + Z_f) \times I_{VFmax}$,因此随着系统外部的等效故障 Z_f 阻抗变小,DG出口侧电压 E_{DG} 也会一并减小,最终导致系统电压无法稳定于参考值.

$$\begin{cases} I_{DG} = I_{VFmax}, \\ U_{DG} < U_{ref}, \\ E_{DG} - I_{VFmax} \times Z_l = U_{DG}, \\ I_{VFmax} = \frac{U_{DG}}{Z_f}. \end{cases} \quad (13)$$

式(13)给出了VF控制逆变器处于电流饱和状态下的分析公式,此时逆变器出口侧电压 E_{DG} 、逆变器出口侧电压 U_{DG} 都会进一步变小,导致无法维持整个系统的稳定.

如图10,根据发生故障的位置可得式(14),其中 Z_{f5} 为 Z_f 与 Z_{load} 等效阻抗.

$$\begin{cases} U_{PCC,f} = (Z_{f5} + Z_{I3}) \times I_{f3}, \\ I_{f3} = I_{f1} + I_{f2}, \\ I_{DG1} = I_{f1}, \\ I_{DG2} = I_{f2}. \end{cases} \quad (14)$$

如图 10,本节基于搭建了一个 PSCAD 软件,搭建了 1 个仿真系统.其中 VF 控制 DG 的参考电压为 220 V;PQ 控制 DG 的参考功率 $P_{ref}=20$ kW 与 $Q_{ref}=0$ kVar; Z_1 、 Z_2 为 DG 滤波阻抗,滤波电路的电感 $L=2$ mH、滤波电容 $C=10$ μ F;等效线路阻抗 $Z_{l1}=0.2568+j0.0326$ Ω 、 $Z_{l2}=0.1284+j0.0163$ Ω 、 $Z_{l3}=0.4971+j0.0565$ Ω .在 $t=1$ 秒在 f_1 处发生三相短路故障,发生故障时的等效故障过渡阻抗分别为 2 Ω 与 0 Ω .

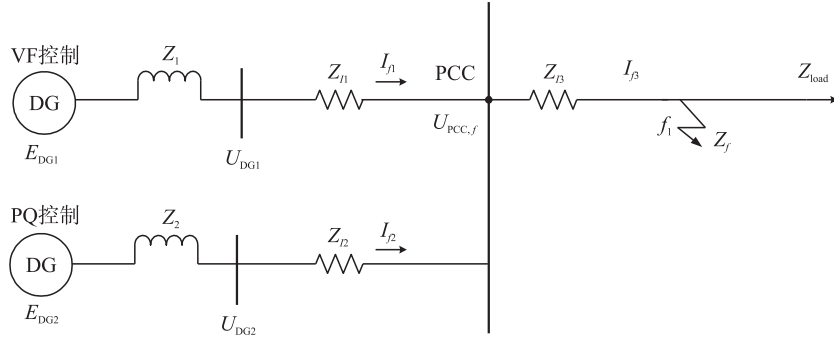


图 10 孤岛运行微电网

Fig.10 Isolated island operation micro-grid

如图 11-12 所示,当故障过渡阻抗为 2 Ω 时,由于 VF 控制逆变器电流没有达到饱和,因此可以稳定整个系统的电压.当故障过渡阻抗为 0 Ω 时,由于电流进一步变大并达到饱和,因此整个孤岛系统的电压无法维持在参考值.

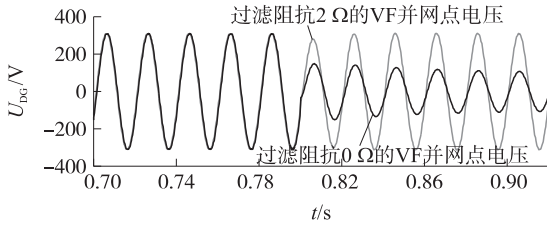

 图 11 孤岛运行下的 VF 逆变器并网电压 U_{DG}

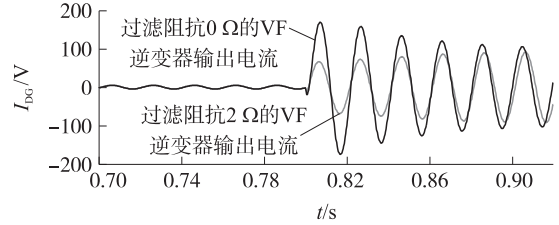
 Fig.11 VF control inverter voltage U_{DG} under island state

 图 12 孤岛运行下的 VF 逆变器输出电流 I_{DG}

 Fig.12 VF control inverter current I_{DG} under island state

如图 13-14 所示,当故障过渡阻抗为 2 Ω 时,由于 VF 控制 DG 可以维持整个孤岛运行系统的电压与频率,而 PQ 控制 DG 的输出功率能够跟随参考值.当故障过渡阻抗为 0 Ω 时,由于 VF 控制 DG 的电流已经饱和,根据式(13)可知,VF 控制 DG 并网点的电压会减少,导致输出功率的减少.而 PQ 控制 DG 输出功率变小显然是因为此时由于系统电压的下降,导致 PQ 控制逆变器输出电流也达到饱和,并且最终使得输出功率减少.

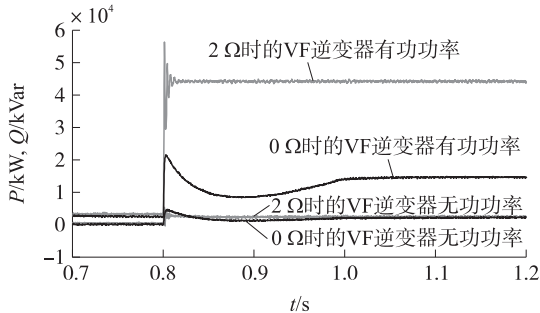


图 13 孤岛运行下的 VF 逆变器输出功率

Fig.13 VF control inverter output power under island state

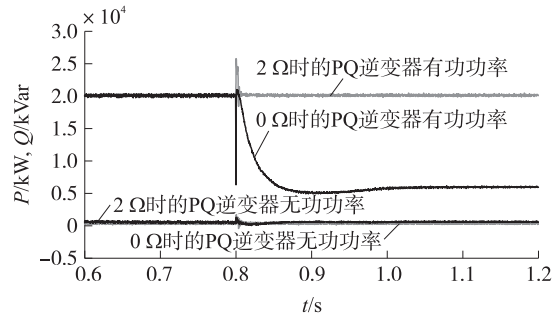


图 14 孤岛运行下的 PQ 逆变器输出功率

Fig.14 PQ control inverter output power under island state

结合式(12)、(13)、(14),以及上一节的 PQ 故障状态分析公式可以对整个处于故障孤岛状态下的微电网系统进行定量分析,结果如表 5、表 6 所示.如表 5、表 6 所示,仿真结果与计算结果较为一致,偏差不超过 2%.由于微电网孤岛运行时同时含有 PQ 控制 DG 与 VF 控制 DG,因此微电网在故障条件下的孤岛运行的特性是两种逆变器其控制方式的互相耦合,基于上一节推导的 PQ 控制 DG 输出特性以及本节推导的 VF 控制逆变器的输出特性,可以较为精确的计算出在孤岛运行故障条件下的系统状态.

表 5 过渡阻抗为 0 Ω 时系统分析结果

Table 5 System analysis results while transition impedance is 0 Ω

	E_{DG1}/V	E_{DG2}/V	U_{DG1}/V	U_{DG2}/V	U_{PCC}/V	I_{G1}/A	I_{G2}/A	I_G/A
仿真值	67.31∠-0.31	58.34∠-0.37	66.01∠-0.41	57.34∠-0.49	52.88∠-0.00	69.40∠-9.82	34.76∠-3.12	104.43∠-7.82
计算值	66.75∠-0.29	57.34∠-0.35	65.75∠-0.39	56.69∠-0.45	51.07∠-0.00	68.9∠-1.0	33.51∠-3.4	102.43∠-7.89

表 6 过渡阻抗为 2 Ω 时系统分析结果

Table 6 System analysis results while transition impedance is 2 Ω

	E_{DG1}/V	E_{DG2}/V	U_{DG1}/V	U_{DG2}/V	U_{PCC}/V	I_{G1}/A	I_{G2}/A	I_G/A
仿真值	219.51∠-0.14	209.10∠-0.15	218.70∠-0.25	208.89∠-0.21	197.88∠-0.00	68.79∠-2.09	31.66∠-1.52	100.55∠-1.78
计算值	220.11∠-0.17	209.61∠-0.13	219.12∠-0.21	209.11∠-0.23	198.18∠-0.00	67.81∠-2.11	31.21∠-1.53	100.37∠-1.81

3 总结

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 3 个方面:

(1)对于采用 PQ 控制的 DG,随着故障等效电阻的不同,以 DG 饱和电压、饱和电流,以及参考功率 P_{ref} 和 Q_{ref} 作为划分故障状态的边界条件.当处于电压饱和或者电流饱和状态时,系统输出功率无法保证.

(2)对于采用 VF 控制的 DG,由于有参考电压的钳制,由于与 PQ 控制不同,只存在电压恒定状态或者电流饱和状态,因此以逆变器输出电流是否饱和作为划分故障的边界条件.当处于电流饱和状态时,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从理论上计算出微电网系统故障时的状态变量,而基于 PSCAD 的仿真则证明本文所提出方法的有效性.

[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(2):1-12.
WANG C S, WU Z, LI P. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2014, 29(2): 1-12. (in Chinese)

[2] Hatziargyriou N, Asano H, Iravani R. Microgrids: an overview of ongoing research, development, and demonstration projects[J]. IEEE power and energy magazine, 2007, 5(4): 78-94.

[3] PEAS LOPES J A, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for analysing microgrids islanded operation [J]. Power Tech, 2005, 21(2): 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,2012,23:54-58.
WANG C S, SUN X Q. An improved short circuit calculation method for distribution network with distributed generations[J]. Automation of electric power systems, 2012, 23: 54-58. (in Chinese)

[5] 贾清泉,孙玲玲,王美娟,等.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,2014,10:1 650-1 657.
JIA Q Q, SUN L L, WANG M J, et al. An adaptive protection method for micro-grid based on node searching[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 10: 1 650-1 657. (in Chinese)

[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,2008,5:38-42.
WANG S X, JIANG X Y, WANG C S. A superposition method of fault analysis for distribution systems containing distributed generations[J]. Automation of electric power systems, 2008, 5: 38-42. (in Chinese)

- [7] 吴争荣,王钢,李海锋,等. 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,2012,18: 92-96,108.
WU Z R, WANG G, LI H F, et al. Fault characteristics analysis of distribution networks considering control scheme of inverter interfaced distributed generation[J]. Automation of electric power systems, 2012, 18: 92-96, 108. (in Chinese)
- [8] 吴争荣,王钢,李海锋,等. 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,2013,1: 130-136.
WU Z R, WANG G, LI H F, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 1: 130-136. (in Chinese)
- [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]. 广州:华南理工大学,2014.
PAN G Q. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [10] BARSALI S, CERAULO M, PELACCHI P, et al. Control techniques of dispersed generators to improve the continuity of electricity supply[J]. Power engineering society winter meeting, 2002, 2(2): 789-794.
- [11] 曾德辉,潘国清,王钢,等. 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.
ZENG D H, PAN G Q, WANG G, et al. Method of fault analysis on microgrid with distributed generation based on V/f control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 16: 2 604-2 611. (in Chinese)
- [12] 李中洲. 含逆变电源微电网的稳态故障分析研究[D]. 天津:天津大学,2012.
LI Z Z. Research on steady-state fault analysis of microgrid with inverter-based generation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]