

# 基于DSL的光伏对称故障特性及等效模型研究

配电网中光伏发电的故障穿越行为极大地影响配电网的故障特性。提出了一种符合光伏并网规程要求的低电压穿越控制策略,在此基础上分析光伏逆变器的对称故障特性,将其合理简化为受并网点电压控制的电流源。然后基于DigSILENT编程语言建立压控电流源模型,将仿真结果与详细模型对比,分析误差来源,在一定范围内验证了简化模型的有效性,为进一步研究含光伏的配电网保护奠定了基础。

林 睿 张君宇 陶维青/合肥工业大学电气与自动化工程学院

## 0 引言

大量分布式电源(Distribution generation, DG)接入配电网,改变了网络的故障特性,对传统的配电网过电流保护造成影响<sup>[1]</sup>。在考虑低电压穿越(LVRT)控制的要求下,为了准确地对光伏发电系统进行并网分析,文献[2]在DigSILENT仿真平台上搭建了并网光伏的工程及控制模型,在环境条件变化等情况下进行了仿真,但这种方法较为费时费力。文献[3]利用稳态时的潮流计算结果,故障时保证DG的输出功率不变,根据并网点电压跌落情况确定DG输出的故障电流。但该方法未考虑逆变器的控制特性,没有无功电流的输出确定。文献[4]基于电网电压定向的矢量控制,通过LVRT控制保证并网点电压跌落时逆变器不过电流,但未给出有功电流参考值的具体计算方法。

文献[5]在计及最新并网规定的基础上,通过建立DG输出电流与公共联结点

电压之间的方程组,提出了含DG配电网的精确故障分析方法。文献[6]在考虑逆变器LVRT控制策略的情况下,分析了DG的短路电流特性,建立电流源等效模型,但没有给出故障时参考电流的调整方式。文献[7]提出了DG在LVRT控制下的故障等效模型,但是文中的DG等效模型处理的比较理想,不能适应DG类型的变化。而且文献[5-7]中逆变器的LVRT穿越执行标准均参考德国,不符合我国的工程实际。

针对PQ控制方式下的单级式光伏逆变器,在DIgSILENT平台上,根据推导公式,提出一种满足并网规程要求的低电压穿越控制策略,基于DIgSILENT仿真语言(DSL)搭建光伏的压控电流源模型,通过详细模型与简化模型仿真结果的比较,在一定范围内验证了等效模型的有效性。

## 1 光伏逆变器拓扑结构及控制策略

### 1.1 逆变器结构及PQ控制

采用单级式光伏逆变器,其典型拓扑如图1所示,主要包括光伏面板、直流母线电容、逆变器及滤波器。

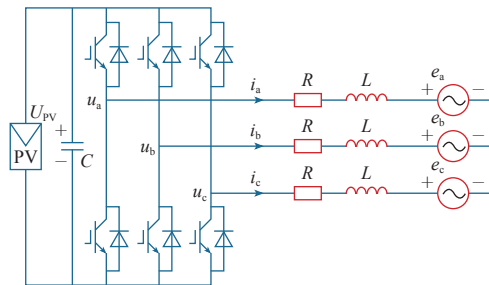


图1 单级式光伏逆变器拓扑



林 睿/硕士研究生

### 关键词/Keywords

光伏逆变器 ·  
低电压穿越 ·  
DigSILENT编程语言 ·  
等效模型 ·  
短路电流 ·

国家重点研发计划(2017YFB0902800)。

$dq$ 旋转坐标系下逆变器的数学方程如下

$$\begin{cases} u_d = Lp i_d + R i_d + \omega L i_q + u_{gd} \\ u_q = Lp i_q + R i_q + \omega L i_d + u_{gq} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $u_d$ 、 $u_q$ 为逆变器桥臂输出电压的 $d$ 、 $q$ 分量; $u_{gd}$ 、 $u_{gq}$ 为电网侧电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $i_d$ 、 $i_q$ 为逆变器输出电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $\omega$ 为电网角频率; $R$ 、 $L$ 为逆变器交流侧滤波电感和电阻; $p$ 为微分算符。

$dq$ 坐标系下, 逆变器交流侧输出有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} P = u_{gd} i_d + u_{gq} i_q \\ Q = u_{gq} i_d - u_{gd} i_q \end{cases} \quad (2)$$

基于电网电压定向的矢量控制, 将网侧电压定向于 $d$ 轴

$$\begin{cases} u_{gd} = U_g \\ u_{gq} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)解耦逆变器输出的有功和无功功率

$$\begin{cases} P = U_g i_d \\ Q = -U_g i_q \end{cases} \quad (4)$$

光伏正常并网运行时, 采用电压外环、电流内环双闭环控制保持输出功率恒定, 通过输出电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量调节输出有功无功。逆变器通常运行于单位功率因数状态, 由最大功率跟踪策略得到直流电压指令 $U_{dref}$ , 控制输出有功功率, 同时将无功电流指令置零。

## 1.2 LVRT控制策略

并网光伏电站需要在电网故障期间保持一定时间不脱网, 并为电网稳定性提供支撑<sup>[9]</sup>。国家电网公司的具体要求为: 电网发生故障后, 电压跌落超过0.1(标么值), 光伏电站提供的无功电流应受并网点电压控制为

$$\begin{cases} I_{q.f} = 0 & u_{PCC.f} > 0.9 \\ I_{q.f} \geq 1.5(0.9 - u_{PCC.f})I_N & 0.2 \leq u_{PCC.f} \leq 0.9 \\ I_{q.f} \geq 1.05I_N & u_{PCC.f} < 0.2 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $u_{PCC.f}$ 为网侧故障时并网点电压; $I_{q.f}$ 为网侧故障时逆变器发出的无功电流; $I_N$ 为逆变器额定电流;均采用标么值形式。

在光伏的LVRT过程中, 逆变器应优先提供无功电流, 而发出的有功功率应使逆变器不限流。逆变器的限流值一般取两倍的额定电流, 故无功电流调节指令为

$$I_{q.f} = \begin{cases} 0 & u_{PCC.f} > 0.9 \\ 2(0.9 - u_{PCC.f})I_N & 0.2 \leq u_{PCC.f} \leq 0.9 \\ 2I_N & u_{PCC.f} < 0.2 \end{cases} \quad (6)$$

无功电流增量与PCC点电压跌落的关系如图2所示, 单位为标么值。图2中,  $K$ 为无功支撑曲线斜率。

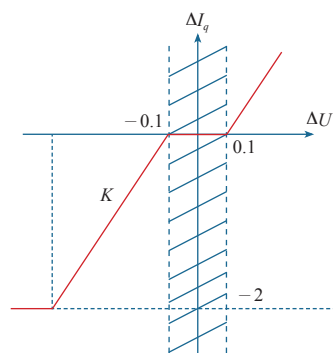


图2 无功电流增量与PCC点电压跌落的关系

在保证故障后输出电流不超出逆变器限流的情况下, 假设光伏故障前后输出的有功不变, 则有功电流指令为

$$I_{d.f} = \begin{cases} \min\left(\frac{P_m}{U_{PCC.f}}, \sqrt{I_{max}^2 - I_{q.f}^2}\right) & u_{PCC.f} > 0.2 \\ 0 & u_{PCC.f} \leq 0.2 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $P_m$ 为电网故障前光伏输出的有功功率; $U_{PCC.f}$ 为并网点故障电压; $I_{max}$ 为逆变器的最大限流值。

当电网侧发生故障时, 根据LVRT运行控制策略,  $P_m$ 一定, 有功、无功电流指令随并网点电压变化。将光伏故障电流的有功分量定向于相量 $U_{PCC.f}$ , 则其输出的故障电流相量如图3所示。 $\delta$ 为相量 $U_{PCC.f}$ 的相角。

## 2 故障等效模型与DSL建模

### 2.1 故障分析等效模型

由上一节中的分析可知, 配电网发生对称故

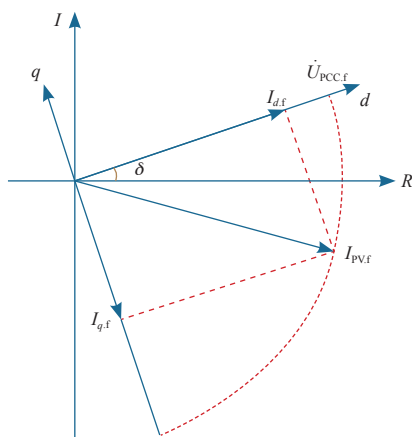


图3 故障电流相量

障时，光伏电源可等效为并网点电压控制的压控电流源模型，即

$$\dot{I}_{PV,f} = F(\dot{U}_{PCC,f}) \quad (8)$$

光伏输出的电流幅值和相位为

$$\begin{cases} |\dot{I}_{PV,f}| = \sqrt{i_{d,f}^2 + i_{q,f}^2} \\ \delta_{I_{PV,f}} = \delta - \arctan(i_{q,f} / i_{d,f}) \end{cases} \quad (9)$$

## 2.2 DSL建模

DSL用于控制器和其他电力系统元件的程序模型中，基于通用控制和逻辑框图提供了灵活的建模和仿真工具，通过灵活的宏定义和丰富的内置函数实现对模型的精确描述和完整控制<sup>[9]</sup>。本文基于DigSILENT平台，使用DSL语言编写代码，使公共点电压控制交流电流源的输出电流，控制框图如图4所示。

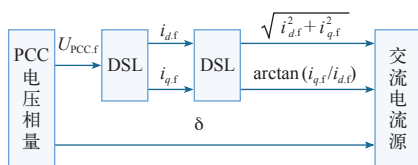


图4 压控电流源控制框图

## 3 仿真分析

为了验证上述分析和简化建模的正确性，基于DigSILENT简立详细的单机式光伏并网系统模型及简化的压控电流源模型。其中详细的单机式光伏并网模型单线图及相关参数如图5所示。

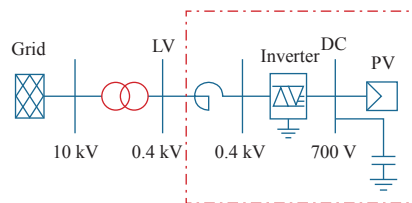


图5 单机式光伏并网模型单线图

使用DSL编写代码使交流电流源受控建立简化模型，代替图5中的点画线框中内的部分，其余部分参数不变。光伏并网系统的主要参数为： $S_N = 0.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ，并网点电压 $U_T = 0.4 \text{ kV}$ ，滤波电阻 $R = 1 \text{ m}\Omega$ ，滤波电感 $L = 0.1 \text{ mH}$ ，直流稳压电容 $C = 5\,000 \text{ }\mu\text{F}$ 。逆变器允许通过最大电流取其额定电流的两倍，无功支持曲线斜率 $K = 2$ ，光伏采用最大功率跟踪控制方式。发生三相对称故障前，假设系统稳态运行时有功功率满发 $P_m = 1$ ，在1 s时低压母线LV处发生三相短路故障，通过设置故障阻抗来控制LV电压跌落程度。

1) 轻度跌落时，设置故障阻抗为 $(40 + j20) \text{ m}\Omega$ ，使电压跌落至0.856，此时详细模型和等效模型仿真结果对比如图6所示。图6中依次为并网点电压跌落值、详细模型/等效压控电流源的电流幅值以及两者电流幅值的相对误差

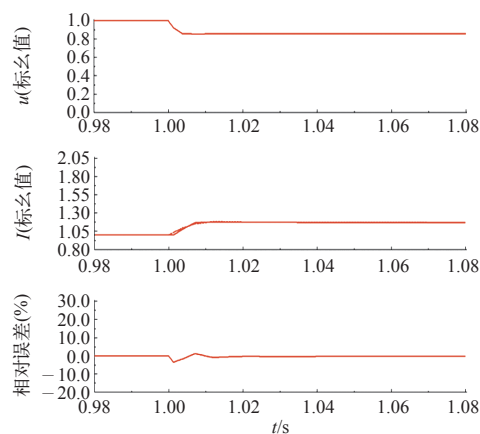


图6 轻度跌落仿真

图6中，实线和虚线分别对应压控电流源和详细模型的仿真结果，两者基本吻合。注意到电压跌落并不是瞬间发生的，由于仿真步长的原因，压控电流源会滞后启动，造成等效模型电流幅值开始略小于详细模型，然后迅速逼近，电流幅值误差为 $-3.3\% \sim 1.34\%$ 。这说明对称故障造成并网

点电压轻度跌落时, 电容电压基本保持稳定, 电压环的动态响应可以忽略, 等效模型的准确性可以保证。

2) 发生较深跌落, 此时故障阻抗为 $(10 + j8) \text{ m}\Omega$ , 使电压跌落至0.578, 仿真结果对比如图7所示。

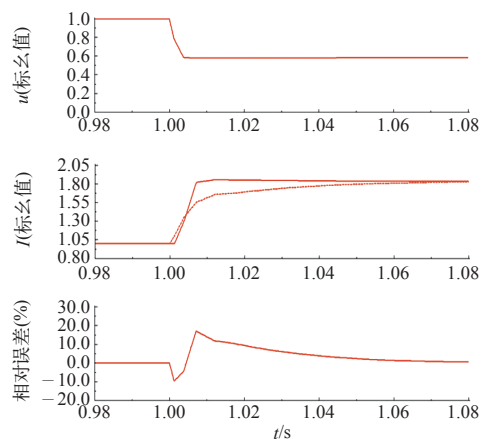


图7 较深跌落仿真

当并网点电压跌落较深时, 电流幅值误差为 $-9.5\% \sim 17\%$ , 开始时电流源延迟启动造成的等效模型偏小, 之后等效模型的幅值明显大于详细模型, 但在1.08 s时基本吻合。由于并网点电压跌落, 短路瞬间光伏输出有功减小使得光伏侧和网侧有功不平衡, 直流电容充电导致直流电压上升, 使得光伏逆变器偏离最大功率跟踪状态, 此时直流电压大于最大功率点电压, 光伏侧有功出力将减小, 而模型简化时, 是假设有功不变的, 故简化模型输出的电流幅值大于详细模型, 这是仿真过程中误差产生的主要原因。电容电压经电压外环调节, 一段时间后稳定于最大功率点电压, 电流幅值稳定于1.82, 小于逆变器电流限值。因此, 网侧故障使并网母线处电压发生较深跌落时, 有功电流受电压外环控制的动态特性不能忽略。

3) 重度跌落时, 此时故障阻抗为 $(3 + j1) \text{ m}\Omega$ , 使电压跌落至0.255, 仿真结果对比如图8所示。

图8中, 电流幅值的最大误差为 $-16.3\%$ , 但是该误差主要是由于电流源延迟启动造成的, 持续时间非常短, 随后等效模型和详细模型的电流幅值基本吻合, 两者都在小于1/4个周波的时间内

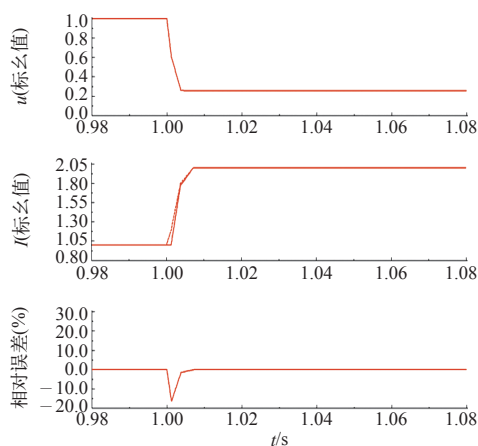


图8 重度跌落仿真

趋于稳定, 稳定值为逆变器的最大电流限值。由于电压跌落严重, 直流电容充电迅速, 有功电流超过逆变器限值使得电压外环闭锁, 此时逆变器仅由电流环控制。因此, 并网母线电压重度跌落时, 电压环的动态特性可以忽略, 在误差允许的范围内, 等效模型较为精确。

上述三种情况, 发生故障前光伏均运行在单位功率因数下, 发出的电流与网侧电压同相位, 故障后并网点电压跌落超过0.1倍标么值, 逆变器向网侧提供无功电流, 此时, 光伏发出的电流滞后于网侧电压, 详细模型仿真结果为 $4.12^\circ$ 、 $20.369^\circ$ 和 $40.613^\circ$ , 等效模型仿真结果为 $4.068^\circ$ 、 $20.256^\circ$ 和 $40.054^\circ$ , 两者具有一致性, 故障后光伏发出三相电流的相位均滞后网侧电压。

## 4 结束语

光伏逆变器的故障电流特性受逆变器控制策略的影响较大, 通过对并网光伏系统电磁暂态模型的合理简化, 将其等效为压控电流源模型, 通过并网点对称故障的仿真, 得到以下结论。

1) 受软件仿真步长的影响, 故障并网点电压没有瞬间跌落, 导致压控电流源启动会有一个较小的延迟, 使故障后等效模型输出电流在一个小的时间段里大于详细模型。这个误差持续时间短, 小于1/4个周波, 故而等效模型在并网点电压轻度跌落和重度跌落时准确度可以保证。

(下转第65页)

- signals [C]. Power & Energy Society General Meeting 2009, Calgary, IEEE, 2009: 1-6.
- [6] 张岚, 殷桂梁, 韩郁, 等. 基于无功微扰/频率偏差相关度的光伏发电系统孤岛检测方法 [C]. 南方电网技术论坛, 2010: 130-133.
- [7] 陈少杰, 钱苏翔, 熊远生, 等. 相位突变结合电压扰动在孤岛检测中应用 [J]. 电力电子技术, 2012, 46 (6): 7-9.
- [8] 朱艳伟, 石新春, 李鹏. 多分辨率奇异谱熵和支持向量机在孤岛与扰动识别中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (7): 64-70.
- [9] 丁庆喜, 田福庆, 罗荣. 基于小波包和改进BP神经网络的滚动轴承故障诊断方法 [J]. 现代电子技术, 2013 (8): 13-16.
- [10] Wang Jing, Yang Qing, Chen Lin, et al. Classification and identification of over-voltage based on HHT and SVM [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38 (8): 2068-2075.
- [11] 吴盛军, 徐青山, 袁晓冬. 光伏防孤岛保护检测标准及试验影响因素分析 [J]. 电网技术, 2015, 39 (4): 924-931.
- [12] 张宝群, 马龙飞, 宫成, 等. 主动移相法在光伏逆变器孤岛检测中的应用 [J]. 电气应用, 2015 (增刊2): 749-752.
- [13] 谢东, 张兴, 曹仁贤, 等. 基于小波变换与神经网络的孤岛检测技术 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (4): 537-544.
- [14] 唐忠, 朱瑞婷, 张合栋, 等. 基于无功电流扰动的孤岛与扰动辨识的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (22): 159-165.
- [15] 王元章, 李智华, 吴春华, 等. 基于BP神经网络的光伏组件在线故障诊断 [J]. 电网技术, 2013, 37 (8): 2094-2100.
- (收稿日期: 2017-09-08) **EA**

(上接第59页)

2) 并网点电压跌落较深但其输出电流小于逆变器输出电流限值时, 光伏的暂态特性主要受有功电流影响。暂态过程中等效模型输出的电流幅值大于详细模型, 此时不能忽略电压环的动态响应, 等效模型只能模拟稳态的输出电流。

3) 对称故障后, 逆变器进入LVRT控制状态, 输出无功电流支撑并网点电压跌落。此时, 光伏的输出电流故障前与网侧电压同相, 故障后转变为滞后网侧电压。

### 参考文献

- [1] Martinez J A, Martin-Arnedo J. Impact of distributed generation on distribution protection and power quality[C]. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009: 1-6.
- [2] 王以笑, 张新昌, 路进升, 等. 基于DigSILENT的并网光伏发电系统的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014 (3): 49-55.
- [3] 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.
- [4] 王京保, 曾国宏, 荆龙, 等. 光伏并网逆变器及其低电压穿越技术[J]. 电器与能效管理技术, 2012 (17): 26-30.
- [5] 吴争荣, 王钢, 李海峰, 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, 33 (1): 130-136.
- [6] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (34): 65-74.
- [7] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含PQ控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (4): 555-561.
- [8] GB/T 19964—2012 光伏发电站接入电力系统技术规定[S].
- [9] DigSILENT GmbH. DigSILENT power factory V15.2—user manual[R]. Germany: DigSILENT GmbH, 2016.
- (收稿日期: 2017-07-20) **EA**