

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190214

基于 GB/T33593 标准的 DG 低电压穿越输出特性研究

张长久¹, 邬小波², 谢小英¹

(1. 国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000; 2. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054)

摘要: 当含分布式电源配电网故障时, 需要分布式电源提供电压支撑, 要求其具备低电压穿越能力。研究分布式电源的低电压穿越输出特性对配电网故障分析和保护设计具有重要意义。依据《分布式电源并网技术要求》(GB/T 33593-2017)建立了分布式电源低电压穿越控制指令和控制规则, 推导出低电压穿越过程中分布式电源故障等效模型, 得出分布式电源低电压穿越输出电流表达式, 并阐述了含分布式电源配电网故障分析的基本方法。算例仿真结果验证了建模及理论分析的正确性。

关键词: 分布式发电; 并网逆变器; 低电压穿越; 故障分析; 故障特性

Research on low voltage ride through of DG characteristics based on GB/T33593 standard

ZHANG Changjiu¹, WU Xiaobo², XIE Xiaoying¹

(1. Qinhuangdao Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Qinhuangdao 066000, China;
2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China)

Abstract: Distributed generation is required to provide voltage support when failure occurred in distribution network connected with distributed generation, and low voltage ride through capability of distributed generation is required. Therefore, investigating the fault output characteristics of distributed generation during low voltage ride through is significant for fault analysis and protection design. According to the technical requirements for grid connection of connected distributed resources (GB/T 33593-2017), the low voltage ride through control instructions and control rules of distributed generation are established in this paper. The fault equivalent model and current description of distributed generation during low voltage ride through are derived. The basic approach of fault calculation for distribution network containing distributed power supplies is discussed. The correctness of the modeling and theoretical analysis is verified by the simulation results of the example.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777121).

Key words: distributed generation; grid connected inverter; low voltage ride through; fault analysis; fault characteristic

0 引言

随着分布式电源(Distributed Generation, DG)的广泛应用, 其大规模并网对配电网安全稳定运行造成影响。在电网故障期间, 为了防止分布式电源大规模脱网给电网造成的冲击, 世界各国相继出台了分布式电源并网规范。我国在近5年相继发布了多部关于分布式电源并网技术要求与设计规范的相关标准^[1-3], 对分布式电源应具备一定的低电压穿越运行能力做出了要求^[4-5]。因此, 有必要研究分布式电源低电压穿越过程的故障输出特性, 为研究适用于分布式电

源规模化接入配电网的继电保护方法提供依据。

目前, 国内外学者对分布式电源故障特性开展了一定的研究。文献[6]提出一种含PQ控制的逆变型分布式电源运行控制策略, 对逆变型分布式电源的故障电流特性进行研究。文献[7-8]建立了逆变型分布式电源和异步型分布式电源的短路等值计算模型。文献[9-10]对相间短路分布式电源故障穿越控制特性进行分析, 建立了含分布式电源配电网相间短路故障分析精确模型。文献[11-12]提出一种适用于最新并网规定的含PQ控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法。文献[13-14]提出一种含V/f控制分布式电源的微电网故障分析方法。文献[15-17]利用改进前推回推法计算多种类型分布式电源故障电流。文献[18-20]根据分布式电源输出电流的基本

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777121); 国网秦皇岛供电公司2018年群众性创新项目资助(520104170004)

约束和瞬时功率理论推导出逆变器电流参考信号通用表达式, 同时保持分布式电源瞬时功率的平均值对功率参考值的跟踪。我国制定的《分布式电源并网技术要求》(GB/T 33593-2017), 对分布式电源故障穿越运行特性及运行时间提出要求, 这就需要明确分布式电源在满足该标准要求的低电压穿越约束下输出电流的特征表现, 从而进行配电网故障分析和保护配置。现有文献尚未开展针对性的研究。

本文基于 GB/T 33593-2017 标准, 从分布式电源故障电流及时间特征两方面建立低电压穿越下的分布式电源故障等效模型, 并给出含分布式电源配电网故障分析的基本思路。算例仿真结果验证了建模及理论分析的正确性。

1 DG 的低电压穿越运行控制

1.1 DG 低电压穿越相关技术标准

《分布式电源并网技术要求》(GB/T 33593-2017) 规定, 通过 10(6) kV 直接接入公共电网, 以及通过 35 kV 电压等级并网的分布式电源应具有一定的低电压穿越能力^[5], 低电压穿越电压幅值及时间应满足图 1 要求。

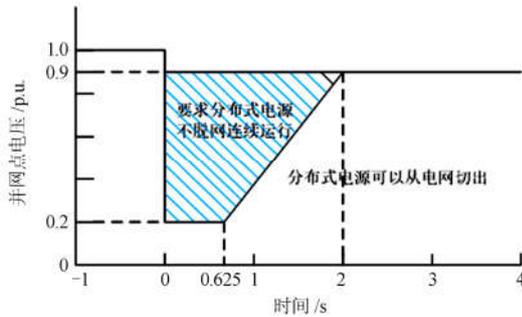


图 1 低电压穿越技术要求

Fig. 1 Low voltage ride through technical requirements

当分布式电源并网点电压在图 1 电压轮廓线及以上区域内时, 分布式电源应不脱网连续运行; 否则, 允许分布式电源切除。接入 220/380V 电压等级直接接入公共电网的分布式电源, 以及通过 10(6) kV 电压等级接入用户侧的分布式电源, 当并网点电压发生异常时, 应按照表 1 所列方式运行。

表 1 电压保护最大时限

Table 1 The maximum time limit for voltage protection

并网点电压	跳闸时限要求
$U < 0.50U_N$	$t \leq 0.2$ s
$0.50U_N \leq U < 0.85U_N$	$t \leq 2$ s
$0.85U_N \leq U < 1.10U_N$	连续运行
$1.10U_N \leq U < 1.35U_N$	$t \leq 2$ s
$U \geq 1.35U_N$	$t \leq 0.2$ s

上述标准对不同分布式电源在电网故障期间是否应具备低电压穿越能力以及低电压穿越的电压幅值及穿越时间做出了具体要求, 但未对分布式电源低电压穿越的无功支撑能力做出具体要求。德国分布式电源并网标准要求每 1% 电压降落至少提供 2% 无功电流^[21]。本文参考 GB/T 33593-2017 及德国分布式电源并网标准, 得出分布式电源低电压穿越运行控制策略。

1.2 低电压穿越模式下逆变器指令电流的生成

在 Park 坐标轴下, 正常运行时分布式电源控制方程为

$$\begin{cases} P = U_d I_d \\ Q = U_d I_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 、 Q 分别为分布式电源输出的有功及无功功率; U_d 为分布式电源并网点电压的 d 轴分量; I_d 、 I_q 为分布式电源输出电流的 d 轴及 q 分量。由式(1)可知, 分布式电源输出电流与其输出功率有关, 通过调节 I_d 及 I_q 从而实现对其输出功率进行调节。

根据 GB/T 33593-2017 可知, 当电网侧电压跌落至 $0.2U_N \sim 0.9U_N$ 时, 分布式电源仍需并网运行并输出无功功率支撑系统电压。为提高故障时分布式电源输出特性, 同时抑制电流谐波, 将正序分量控制^[20-21]引入故障期间分布式电源控制策略, 采用 PCC 点正序分量作为参考, 同时滤除负序分量产生的影响。因此, 电网发生故障时的分布式电源控制方程可表示为

$$\begin{cases} I_{q,f-ref}^* = \min \left\{ I_{q,0} + K_q \left| \frac{\Delta U}{U_N} \right|, I_{max} \right\} \\ I_{d,f-ref}^* = \min \left\{ \frac{P_{ref}}{U_{f,PCC}^+}, \sqrt{I_{max}^2 - I_{q,f-ref}^{*2}} \right\} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_{q,f-ref}^*$ 、 $I_{d,f-ref}^*$ 分别为电网故障期间分布式电源逆变器无功及有功指令电流; K_q 为无功支撑系数; $I_{q,0}$ 为故障前分布式电源输出的无功电流; $U_{f,PCC}^+$ 、 ΔU 分别为电网故障情况下 PCC 点正序电压和电压跌落量; U_N 为额定电压; I_{max} 为逆变器最大允许输出电流, 通常为分布式电源额定电流值的 2 倍。根据规定要求, 电网故障期间分布式电源无功电流优先控制, 其输出值的大小与 PCC 点电压跌落量 ΔU 及无功支撑系数 K_q 有关, 而分布式电源输出的有功电流受逆变器限幅环节限制。

此外, 根据 GB/T 33593-2017 技术要求故障期间在不同压降情况下, 分布式电源低电压穿越运行具有时间限制。即当电压跌落至 $0.9U_N \sim 0.2U_N$ 时, 分布式电源低电压穿越运行的时间与电压跌落成比例关系; 电网电压跌落至 $0.9U_N \sim 1.0U_N$ 时, 分布式

电源不脱网连续运行。设分布式电源低电压穿越运行的限定时间为 t^* ，可表示为

$$t^* = \begin{cases} \infty; & \alpha \in (0.9, 1.0) \\ \left[\frac{(2-0.625)}{(0.9-0.2)}(\alpha-0.2) + 0.625 \right] N(t); & \alpha \in [0.2, 0.9] \end{cases} \quad (3)$$

$$N(t) = \begin{cases} 1 & \text{并网运行, } t \leq t^* \\ 0 & \text{脱网, } t > t^* \end{cases} \quad (4)$$

式中： α 为故障期间电网电压跌落系数， $\alpha = \frac{U_{f,pcc}}{U_N}$ ； t 为分布式电源低电压穿越运行时间； $N(t)$

代表分布式电源运行状态，是受规定分布式电源并网时间控制的函数，取值为1表示分布式电源并网运行，0表示脱网。

因此，低电压穿越过程分布式电源控制指令电流还受故障后分布式电源不脱网运行时间影响。根据德国分布式电源中压并网标准^[7]要求， K_q 可取值为2。 $I_{q,f-ref}^*$ 可表达为

$$I_{q,f-ref}^* = \begin{cases} I_{q,0} N(t), & \alpha \in (0.9, 1.0) \\ \min \left[\left(I_{q,0} + K_p \alpha \right), I_{max} \right] N(t), & \alpha \in [0.2, 0.9] \end{cases} \quad (5)$$

分布式电源有功电流参考指令则根据无功指令电流的情况由式(2)计算得到。由于逆变器暂态过程时间约为1~2 ms，而分布式电源低电压穿越时间要求为625 ms，二者相比，逆变器暂态过程变化很快。因此在分布式电源低电压穿越控制中，逆变器暂态过程可以忽略不计，分布式电源逆变器指令电流计算不需考虑逆变器暂态过程的影响。

1.3 低电压穿越过程并网逆变器控制

分布式电源并网运行时，通常采用恒功率 PQ 控制策略，通过采集系统侧电压与逆变器输出侧电流，解耦有功功率和无功功率，实现电压外环-电流内环的前馈补偿和 PI 调节控制方式，从而得到逆变器调制信号。逆变器 PQ 控制如图 2 所示。

根据低电压穿越要求，低电压穿越过程并网逆变器控制策略应以不同并网点电压跌落情况下分布式电源输出无功电流为目标对逆变器进行控制调节。在逆变器 PQ 控制策略基础上，闭锁功率外环，电流内环根据电网电压跌落情况按式(2)对逆变器无功指令电流进行调整，有功电流指令根据无功指令进行相应调整。图 3 为低电压穿越过程中逆变器控制策略控制框图。

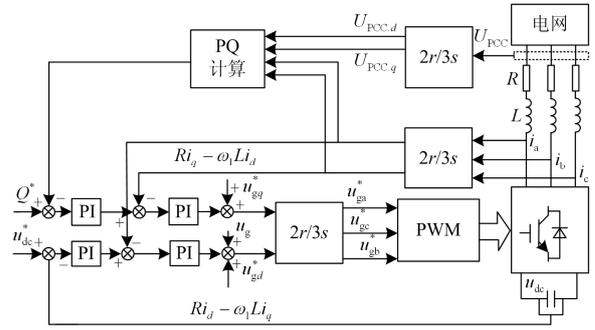


图 2 逆变器 PQ 控制框图

Fig. 2 Block diagram of inverter PQ control

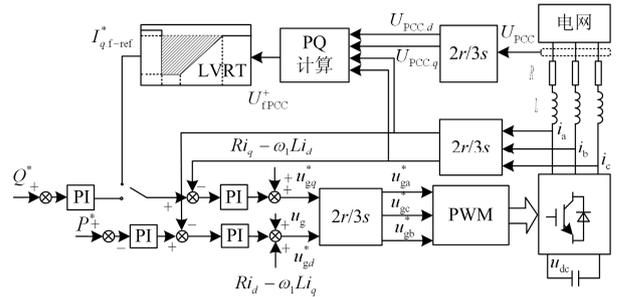


图 3 低电压穿越过程逆变器控制框图

Fig. 3 Block diagram of low voltage ride through inverter control

低电压穿越逆变器控制策略流程为实时检测分布式电源并网点正序电压，判断 α 取值；若 $\alpha > 0.9$ ，分布式电源逆变器执行 PQ 控制策略；若 $0.2 \leq \alpha \leq 0.9$ ，即并网点电压跌落至 90% 以下时，闭锁功率-电压外环，联合式(2)及式(5)计算无功参考电流及有功参考电流，并直接加到电流内环；当低电压穿越运行时间达到标准限定时间时，控制逆变器使分布式电源脱网。

2 低电压穿越控制的 DG 输出特性分析

2.1 DG 在低电压穿越方式下输出故障电流特性

电网发生故障时，逆变器采用低电压穿越控制策略，其无功电流指令和有功电流指令受并网点电压控制，使分布式电源可等效为受并网点电压控制的正序电流源，低电压穿越控制下的分布式电源输出故障电流分量可表示为

$$\begin{cases} I_{d,f,t} = \min \left\{ \frac{P_{ref}}{U_{f,PCC}^+}, \sqrt{I_{max}^2 - I_{q,f}^2} \right\} N(t) \\ I_{q,f,t} = \min \left\{ K_q (0.9 - \alpha) I_N, I_{max} \right\} N(t) \\ I_{DG,f} = \sqrt{I_{d,f}^2 + I_{q,f}^2} \\ \theta = \arctan \left(\frac{I_{d,f,t}}{I_{q,f,t}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_N 为分布式电源额定电流; $I_{d,f}$ 和 $I_{q,f}$ 分别为电网故障时分布式电源输出的有功电流及无功电流; $I_{DG,f}$ 和 θ 分别为分布式电源输出故障电流幅值和相位。

电网故障时, 当 I_{\max} 取 2 p.u., K_q 取 2 时, 可求得电压跌落系数为 0.5215, 可得

$$\begin{cases} I_{DG,f} = \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^2 + [2(0.9 - \alpha)]^2} \\ \theta = \arctan[1.5\alpha(0.9 - \alpha)] \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)分析得出分布式电源低电压穿越过程的故障电流特性为

(1) 当电网电压跌落到 0.5215 ~ 0.9 p.u. 时, 即 $\alpha \in [0.5215, 0.9]$ 时, 分布式电源输出故障电流小于逆变器输出最大允许值 I_{\max} , 故障电流幅值为 $I_{DG,f} \in [1.12 \text{ p.u.}, 2.0 \text{ p.u.}]$, 相角滞后并网点电压 $0^\circ \sim 17^\circ$, 电流幅值及相角随并网点电压跌落程度增大而增大, 可等效为受并网点电压控制的电流源, 分布式电源故障电流输出时间为 t^* , 具体由式(3)得出, t^* 时刻后分布式电源脱网。

(2) 当电网电压跌落到 0.2 ~ 0.5215 p.u. 之间时, 即 $\alpha \in [0.2, 0.5215]$ 时, 分布式电源输出故障电流最大幅值为 2 p.u., 相位滞后并网点电压 $17^\circ \sim 31^\circ$, 可等效为恒流源, 故障电流输出时间同样由式(3)计算得出。

在低电压穿越过程中, 并网点电压跌落程度及电压相位会影响分布式电源输出的故障电流。线路阻抗和故障类型会影响故障后电压正序分量的相位, 造成分布式电源输出故障电流的大小和相位随不同故障条件而变化。

2.2 DG 与配电网的故障交互模型

以图 4 所示的简单配电网为例, 对含分布式电源配电网的接地故障进行分析。

图 4 中 l_{AB} 、 l_{BC} 、 l_{CD} 分别为线路 AB、BC、CD 的长度; k_1 、 k_2 、 k_3 分别为不同故障点(分别距离 A 母线 l_1 、 l_2 、 l_3)。

k_1 发生故障时, 电压与电流的关系为

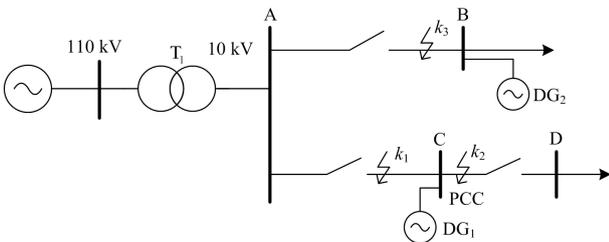


图 4 分布式电源并网系统示意图

Fig. 4 DG grid-connected system

$$\begin{cases} \dot{U}_{f,PCC} = (\dot{I}_{2,f} - \frac{\dot{E}_s - \dot{I}_{s,f}Z_s}{l_2Z_2})(l_{AC} - l_1)Z_2 \\ \dot{I}_{DG1,f} = \dot{I}_{2,f} - \frac{\dot{E}_s - \dot{I}_{s,f}Z_s}{l_{AC}Z_2} \\ I_{DGn,f} = \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^2 + [2(0.9 - \alpha)]^2} \end{cases} \quad (8)$$

k_2 发生短路故障时, 电压电流关系为

$$\begin{cases} \dot{U}_{f,PCC} = \dot{I}_{2,f}Z_2(l_2 - l_{AC}) \\ \dot{E}_s = \dot{I}_{s,f}Z_s + \dot{I}_{AC,f}l_{AC}Z_1 + \dot{U}_{f,PCC} \\ I_{DGn,f} = \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^2 + [2(0.9 - \alpha)]^2} \end{cases} \quad (9)$$

k_3 发生短路故障时, 电压电流关系为

$$\begin{cases} \dot{U}_{f,PCC} = \dot{I}_{1,f}l_1Z_1 + \dot{I}_{AC,f}l_{AC}Z_2 \\ \dot{I}_{DG2,f} = \dot{I}_{3,f} - \frac{\dot{E}_s - \dot{I}_{s,f}Z_s}{l_3Z_3} \\ I_{DGn,f} = \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha}\right)^2 + [2(0.9 - \alpha)]^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: \dot{E}_s 为系统电压; Z_s 为系统阻抗; Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为线路 AC、CD、AB 的单位阻抗; $\dot{I}_{n,f}$ 为故障点 n 的电流, $n=1,2,\dots$; $\dot{I}_{DGn,f}$ 为分布式电源提供的故障电流; α 为故障点电压与额定电压比值。

根据不同故障情况分析可知分布式电源输出电流与 $U_{f,PCC}$ 具有耦合关系。

3 含低电压穿越 DG 的配电网故障计算

由 2.1 节分析可知, 分布式电源低电压穿越过程等效为受并网点电压控制的受控电流源, 其输出的故障电流的幅值和相位与并网点电压存在复杂的非线性关系, 通常采用迭代法进行配电网故障计算, 算法流程如图 5 所示, 具体步骤如下。

(1) 建立配电网各序网络节点电压方程。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 & \dot{I}_2 & \dots & \dot{I}_{DG1,f} & \dots & \dot{I}_n \end{bmatrix}^T = \mathbf{Y} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 & \dot{U}_2 & \dots & \dot{U}_{DG1,f} & \dots & \dot{U}_n \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

式中, $\mathbf{Y} = [Y_{ij}]_{n \times n}$ 为配电网节点导纳矩阵。

联立式(7)、式(11)可建立配电网节点电压的求解方程组。上述方程为非线性方程, 无法通过线性变换直接求解, 本文采用迭代修正的求解方法, 其收敛判据为

$$\max \{U_{i,f}^{(k)} - U_{i,f}^{(k-1)}\} < \gamma \quad (12)$$

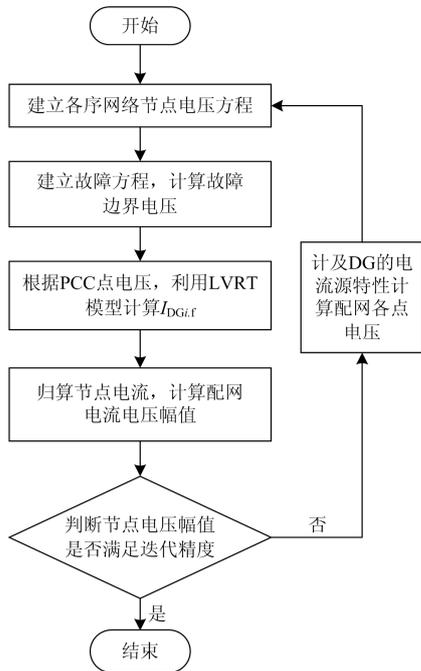


图 5 分布式电源电网故障分析方法流程图

Fig. 5 Flow chart of DG network fault analysis method

式中: $U_{i,f}^{(k)}$ 、 $U_{i,f}^{(k-1)}$ 分别为第 k 步和第 $k-1$ 步配电网节点 i 电压; γ 为迭代精度阈值。

(2) 根据配电网故障类型建立故障边界条件方程, 将分布式电源故障前电流作为其故障模型的初始值, 联立式(11)及故障边界条件求解配电网各节点电压和各支路电流。

(3) 根据分布式电源故障穿越故障模型及步骤(2)计算得出的各分布式电源并网点电压, 更新分布式电源输出故障电流, 各分布式电源低电压穿越过程中提供的故障电流 $\dot{I}_{DG,f}$ 由式(7)计算得出。

(4) 若满足式(12), 进入步骤(5); 否则, 各节点电压的计算结果代入各受控电流源模型, 联立故障边界条件和节点电压方程重新迭代求解。

(5) 根据各节点电压计算结果和配电网阻抗, 计算各支路电流, 完成故障计算。

4 仿真实验

4.1 无功指令

依据低电压穿越控制策略可得如表 2 所示不同电压跌落情况下分布式电源有功和无功电流指令数值。表 2 中跌落比为并网点实际电压与额定电压之差与额定电压之比。无功指令与有功指令均为故障后的指令值。从数据中分析可得, 故障前分布式电源运行状况以及有功无功控制电流大小, 直接影响到故障发生时无功指令与有功指令的变化幅度。同

样, 基于故障前分布式电源的具体运行状况, 例如空载、轻载或重载, 统筹整体网络的负载情况, 分析不同控制策略下的配电网暂态过程, 是研究配电网继电保护的大前提, 也是研究全新保护方案的关键基础。

表 2 分布式电源在低电压穿越控制策略下的输出

Table 2 Output of DG under low voltage ride

through control strategy				
跌落比	故障前 电流/p.u.	无功 指令/p.u.	有功 指令/p.u.	电流 相角/(°)
8%	1	0	1	0
30%	1	0.6	1	30.96
50%	1	1	0.663	32.63
70%	1	1.2	0	90
8%	0.8	0	0.8	0
30%	0.8	0.6	0.8	36.87
50%	0.8	1	0.663	32.63
70%	0.8	1.2	0	90
8%	0.6	0	0.6	0
30%	0.6	0.6	0.6	45
50%	0.6	1	0.6	59.03
70%	0.6	1.2	0	90
8%	0.3	0	0.3	0
30%	0.3	0.6	0.3	63.43
50%	0.3	1	0.3	73.30
70%	0.3	1.2	0	90

依据上述分析, 当故障发生时, 随着电压跌落加深, 有功电流持续减小, 无功电流持续上升。分布式电源参与网络的无功与电压支撑。

4.2 仿真分析

根据前文分析可知电压跌落的幅度、保护动作时间、持续时间与并网方式均会对低电压穿越控制策略以及分布式电源运行产生影响。因此, 在仿真构建上需进行一定程度的设定与简化。基于仿真模型建立 10 kV 网络。构建分布式电源等效网络, 分析等效网络正常运行时潮流分布, 包括各节点电压功率, 假设发生严重三相短路问题, 电网进入低电压穿越控制, 即进入不同工况运行, 分析不同电压跌落情况下低电压穿越控制效果, 观察电流变化, 多节点电网等效模型如图 6 所示, 线路等效参数如表 3 所示。

表 3 线路基本参数

Table 3 Basic parameters of the line

线路电阻/(Ω/km)	线路电抗/(Ω/km)	线路电导/(S/km)
0.33	0.342	2.71×10^{-4}

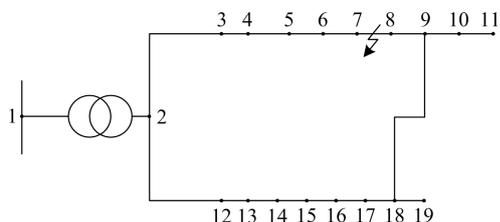


图 6 故障设定图

Fig. 6 Fault setting figure

设定两个故障隔离时间, $t_1=0.5\text{ s}$, $t_2=2\text{ s}$, 设定电压跌落幅度为 15%、55%与 85%(电压实际幅值为 85%、45%、15%的额定电压), 不同条件下电流计算方法不同, 考虑直接并网方式与间接并网方式的分布式电源容量各占比 50%, 分布式电源切出时间按表 6 设定为最大值, 根据式(9)分析, 当 $t=2\text{ s}$ 时仅考虑 $U>0.509t-0.118$ 。基于这些条件可以得到不同运行情况时的运行时间及切出时间。

简化分析, 假设故障发生前运行功率因数为 1, 以逆变型分布式电源为例, 则可得表 4。

表 4 分布式电源的低电压穿越输出表

Table 4 Output of DG under low voltage ride through

跌落幅度	故障前 电流/p.u.	无功 指令/p.u.	有功 指令/p.u.	电流 相角/(°)
15%	0.4	0.7	0.4	60.26
55%	0.4	0.9	0.4	66.04
85%	0.4	1.2	0	90

分布式电源在 15%跌落幅度、0.5 s 故障时间下仿真结果如图 7 所示。图中故障时间设定为 0 s, 分布式电源检测及输出延时按最大设定为 0.02 s, 系统进入运行工况 II。

分布式电源在 55%跌落幅度、0.5 s 故障时间下仿真结果如图 8 所示。图中故障时间同样设定为 0 s, 分布式电源检测及输出延时按最大设定为 0.02 s, 系统进入运行工况 II。

电压跌落 85%情况下有功电流无功电流变化结果如图 9 所示, 系统进入运行工况 II。

电压跌落超过限值时, 系统进入低电压穿越控制, 有功电流降低, 无功电流迅速增加, 电压跌落 15%和 55%时有功电流维持稳定, 而无功电流有较

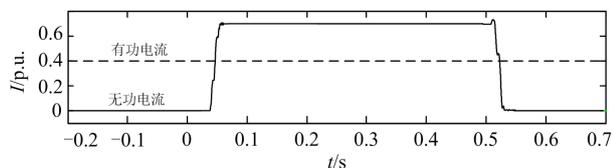


图 7 电压跌落 15%时分布式电源输出电流

Fig. 7 Output fault current of DG with 15% voltage drop

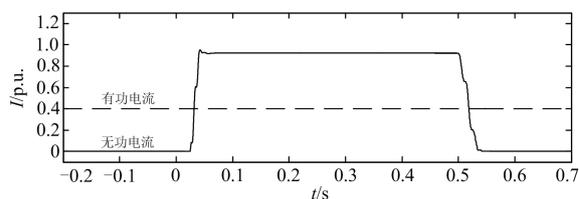


图 8 电压跌落 55%时分布式电源输出电流

Fig. 8 Output current of fault DG with 55% voltage drop

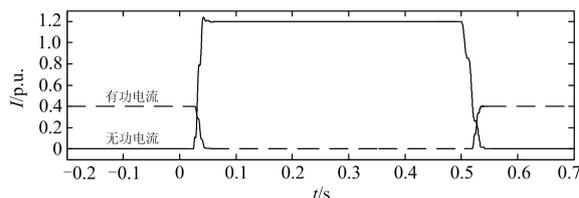


图 9 电压跌落 85%时分布式电源输出电流

Fig. 9 Output current of fault DG with 85% voltage drop

大幅度增加, 尤其以 85%电压跌落较为明显, 有功电流降低为零, 电源全部提供无功电流以支撑电压降落, 说明低电压穿越有良好的控制效果。

如图 6 所示系统, 设起始运行电压 10.1 kV(符合基本电压要求), 当故障发生, 电压跌落至 8.5 kV, 此时已偏离额定电压 15%, 进入相应低电压穿越保护模式。仿真结果如图 10 和图 11 所示。

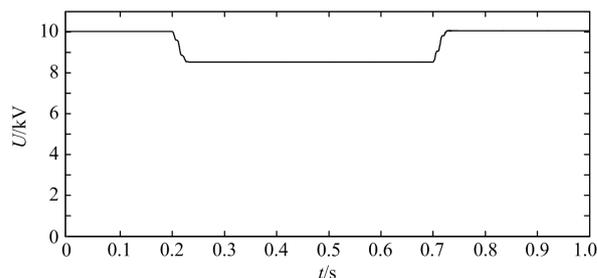


图 10 故障节点 15%电压跌落曲线

Fig. 10 Faulty node 15% voltage drop curve

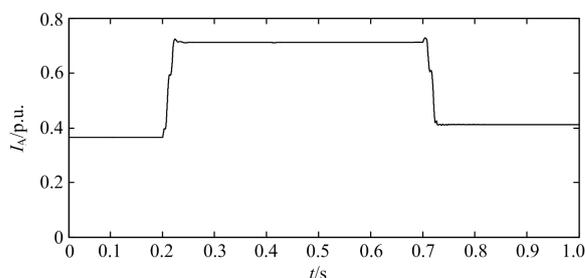


图 11 低电压穿越控制模式下分布式电源电流输出图

Fig. 11 Output current of DG under low voltage ride through control mode

根据电压跌落幅值进入低电压穿越控制, 分布式电源提供更多的无功补偿量解决电压故障降落问题, 在规定时间内恢复电压幅值。同理对故障跌落 55%、85% 仿真验证控制效果同样符合要求。

5 结论

本文从输出电流及持续时间两方面特征建立了遵循 GB/T 33593-2017 标准要求的分布式电源低电压穿越输出等效模型, 并给出含分布式电源配电网故障分析的基本策略。在 GB/T 33593-2017 标准约束下, 具备低电压穿越功能的分布式电源呈现特有的输出特征, 其输出电流受接入点电压和持续时间双重影响, 呈现非线性受控电流源特性。由于分布式电源向电网注入的故障电流受接入点电压控制, 而注入电流又会影响到接入点电压, 因而含低电压穿越分布式电源配电网的故障计算采用源-网交互迭代来实现。仿真结果验证了本文理论分析与建模的正确性。本文建立的低电压穿越下分布式电源故障等效模型为分布式电源规模化接入配电网继电保护整定提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] 国家能源局. 光伏发电系统接入配电网技术规范: GB/T 29319—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
National Energy Agency. Technical requirements for connecting photovoltaic power system to distribution network: GB/T 29319—2012[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2012.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 光伏发电接入配电网设计规范: GB/T 50865—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Design code for connecting to distribution network for distributed generation: GB/T 50865—2013[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2013.
- [3] 中国电力企业联合会. 分布式电源接入电网技术规定: NB/T 32015-2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
China Electricity Council. Technical rule for distributed resources connected to distribution network: NB/T 32015—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW 1480—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Technical rule for distributed resources connected to power grid: Q/GDW-1480—2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. 分布式电源并网技术要求: GB/T 33593—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Technical requirements for grid connection of connected distributed resources: GB/T 33593—2017[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2017.
- [6] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变器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.
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [7] 尹项根, 张哲, 肖繁, 等. 分布式电源短路计算模型及电网故障计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 1-9.
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, XIAO Fan, et al. Study on short-circuit calculation model of distributed generators and fault analysis method of power system with distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 1-9.
- [8] 李生民, 贾铎, 肖亚敏. 采用新型动态撬棒的 DFIG 低高电压连锁故障穿越技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 79-86.
LI Shengmin, JIA Duo, XIAO Yamin. Low-high voltage chain fault ride-through technology of DFIG with active crowbar[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 79-86.
- [9] 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, 33(1): 130-136.
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136.
- [10] 陈晓龙, 李永丽, 谭会征, 等. 含逆变器型分布式电源的配电网自适应正序电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 107-112.
CHEN Xiaolong, LI Yongli, TAN Huizheng, et al. An adaptive instantaneous trip protection based on positive-sequence current for distribution network with IBDG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 107-112.

- [11] 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, 13.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74, 13.
- [12] 司新跃. 逆变型分布式电源故障建模与配电网保护[D]. 济南: 山东大学, 2016: 30-35.
SI Xinyue. Fault model of inverter based distributed generation and distribution system protection[D]. Jinan: Shandong University, 2016: 30-35.
- [13] 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.
- [14] 季亮, 张海涛, 任建铭, 等. 基于逆变型 DG 控制特性的微电网故障特征分析[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 165-172.
JI Liang, ZHANG Haitao, REN Jianming, et al. New microgrid fault analysis method based on inverter-type DG characteristic[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 165-172.
- [15] BARAN M E, EL-MARKABY I. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1757-1764.
- [16] 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.
WANG Shouxiang, JIANG Xingyue, WANG Chengshan. A superposition method of fault analysis for distribution systems containing distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 38-42.
- [17] YOUSSEF K. H. A new method for online sensitivity-based distributed voltage control and short circuit analysis of unbalanced distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1253-1260.
- [18] 叶玲. 含逆变型分布式电源电网短路电流计算方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 25-29.
YE Ling. Research on short-circuit calculation method for inverter interfaced distributed generator integrated into power system[D]. Chongqing: Chongqing university, 2016: 25-29.
- [19] 康晴, 罗奕, 卢新佳, 等. 基于变流器控制策略的微电网故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 147-153.
KANG Qing, LUO Yi, LU Xinjia, et al. Simulation study on microgrid fault characteristics based on converters control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 147-153.
- [20] BUI D M, LIEN K Y, CHEN S L, et al. Investigate dynamic and transient characteristics of microgrid operation and develop a fast-scalable-adaptable algorithm for fault protection system[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 120(3): 214-233.
- [21] NETZBETREIBER V D. Network and system rules of the German transmission system operators[S]. Berlin, German: VDN, 2007.
- [22] 王岩, 魏林君, 高峰, 等. 光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 70-78.
WANG Yan, WEI Linjun, GAO Feng, et al. Coordinated control strategy between large-scale photovoltaic power station and VSC-HVDC for low voltage ride-through operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 70-78.
- [23] 王志涛, 武志刚, 高厚磊, 等. 重合闸与低电压穿越相配合的有源配电网故障恢复方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 81-87.
WANG Zhitao, WU Zhigang, GAO Houlei, et al. A fault recovery scheme cooperating with reclosing and LVRT for active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 81-87.

收稿日期: 2019-03-01; 修回日期: 2019-04-23

作者简介:

张长久(1966—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为分布式电源低电压穿越控制与配电网继电保护; E-mail: qhdzhangcj@126.com

郭小波(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电网继电保护;

谢小英(1967—), 女, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源电力系统运行与控制。

(编辑 张爱琴)