

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210419

逆变型分布式电源接入配电网单相断线故障零序电压分析

徐岩¹, 邹南¹, 马天祥²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003;
2. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 随着绝缘导线的大量应用, 配电网发生断线故障概率增加。针对逆变类分布式电源(Inverter Interfaced Distributed Generation, IIDG)对传统断线故障特性产生影响这一问题, 分析并仿真实验验证了 IIDG 接入配电网发生断线故障时的故障特征。首先, 建立了含 IIDG 配电网故障模型, 推导得出单相断线不接地、单相断线电源侧接地以及单相断线负荷侧接地三种故障形态下的断口两侧零序电压表达式。其次, 通过绘制相量图的方法, 分析了故障位置、过渡电阻以及 IIDG 输出特性对系统侧零序电压分布的影响。最后, 分析了 IIDG 不同额定容量下零序电压的变化情况。理论分析结果表明, 只有故障点下游的 IIDG 才会对零序电压分布轨迹产生影响。仿真结果验证了所述分析方法的合理性以及分析结果的正确性。

关键词: 配电网; IIDG; 断线; 零序电压; 相量图

Analysis of zero-sequence voltage of a single-phase disconnection fault of inverter interfaced distributed generation connected to a distribution network

XU Yan¹, ZOU Nan¹, MA Tianxiang²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: With the large-scale application of insulated wires, the probability of disconnection faults in the distribution network has increased. Given the problem of the influence of inverter interfaced distributed generation (IIDG) on the characteristics of traditional disconnection faults, this paper analyzes and simulates to verify the fault characteristics of the disconnection fault when the IIDG is connected to the distribution network. First, a fault model of the distribution network containing IIDG is established, and the zero sequence voltage expressions are derived for both sides of the fracture under three fault forms: single-phase disconnection without grounding, single-phase disconnection power-side grounding, and single-phase disconnection load-side grounding. Secondly, by drawing a phasor diagram, the influence of fault location, transition resistance and output characteristics of IIDG on the zero sequence voltage distribution on the system side is analyzed. Finally, the changes of zero-sequence voltage under different rated capacities of IIDG are analyzed. Theoretical analysis results show that only the IIDG downstream of the fault point can affect the zero-sequence voltage distribution trajectory. The simulation results verify the rationality of the analysis described in this paper and the correctness of the analysis results.

This work is supported by the Science & Technology Program of Hebei Province (No. 20314301D).

Key words: distribution network; IIDG; disconnection; zero-sequence voltage; phasor diagram

0 引言

在配电网中, 单相断线故障已经成为常见故障

之一^[1-3], 主要原因是绝缘导线应用之后, 电弧无法在导线上随意移动, 绝缘外皮无法散热, 导致线路温度过高被烧断。我国配电网主要采用中性点不接地或经消弧线圈接地方式, 当发生断线故障后, 电网中不会出现大电流, 但断开的导线掉落在大地上, 会对人的生命安全造成威胁; 其次, 单相断线故障

基金项目: 河北省科技计划项目资助(20314301D); 国家电网公司科技项目资助(kj2020-064)

会造成电动机缺相运行、发热甚至烧毁。由于配电网发生断线故障后,其电压特征变化明显,尤其是零序电压,目前配电网断线故障保护也多采用电压量构成的保护原理,因此有必要对配电网断线故障零序电压分布特征进行研究。

随着传统化石能源的短缺和环境问题的日益加剧,采用清洁能源的分布式发电及就地并网技术受到广泛的关注。有源配电网具有能耗低、投资少、灵活可靠、充分利用可再生能源等优点,是未来的发展方向^[4-6]。然而分布式电源的接入使得传统单电源辐射状供电的简单网络变为多电源多端供电的复杂网络,配网潮流及故障电流均发生改变^[7],尤其是以逆变器为接口的分布式电源的故障特性不同于传统电源故障特性^[8-10],因此有必要研究断线故障下的 IIDG 故障特性。

目前,针对含 IIDG 配电网的故障特性分析已有大量研究,文献[11-14]考虑了 IIDG 最新并网规定,分析了分布式电源在正常运行及相间短路故障时的输出特性,从而建立了在相间短路故障条件下的等值模型,其次,基于 IIDG 等值模型建立了含 IIDG 配电网稳态及相间短路故障分析模型,提出了含 IIDG 配网发生相间短路故障的分析方法。文献[15-19]分析了分布式电源对配电网短路电流的影响并进行了大量的仿真分析。文献[20]建立了考虑 IIDG 控制策略的故障电流数学模型,进而提出了一种仅利用被保护线路两端电气量估计 IIDG 故障电流的方法。目前的研究主要是针对含分布式电源的配电网短路故障分析,而针对配电网发生断线故障特性的研究还比较少。文献[21]讨论了配网在正常运行时系统侧位移电压及增大位移电压的方法;文献[22-23]分别针对不接地系统和谐振接地系统单相断线故障建立了故障模型,综合故障类型、故障线路对地电容占系统总对地电容的比例、断线位置、负载阻抗大小和接地电阻大小等影响因素,分析了地电位与中性点偏移电压的变化规律,并进一步推导了断口前后三相电压、线电压的幅值和相位等电气量特征,但并未考虑 IIDG 的影响;文献[24]提出了一种基于电压稳态信息的断线故障定位方法,并分析了分布式电源接入对断线故障特征的影响,但并未给出 IIDG 影响的具体公式及故障分析;文献[25]分析了配电网单相断线故障下 DG 的输出特性,并建立了 DG 的等值模型,建立了含 DG 的配电网单相断线故障等效电路,推导了故障前后 DG 输出电流的表达式并分析了故障前后 DG 输出电流的变化特征,但未分析 IIDG 对系统电压的影响。

综上所述,目前大量的研究主要针对含 IIDG 配电网相间短路故障,针对断线故障特征的研究也局限于不含 IIDG 配电网且较少,而目前针对含 IIDG 配电网断线故障的研究非常少,尤其是 IIDG 对系统电压的影响分析。因此本文在前人研究的基础上,以 10 kV 不接地系统为例,综合考虑故障位置、过渡电阻以及 IIDG 接入位置的影响,给出了单相断线不接地、单相断线电源侧接地以及单相断线负荷侧接地等三种故障形态下的故障断口两侧零序电压表达式,利用仿真实验验证了分析结果的正确性,本文分析结果可为配电网断线故障检测及定位方法研究提供理论依据。

1 IIDG 的控制特性及等值模型

1.1 IIDG 正常运行控制特性与等值模型

逆变类分布式电源经过逆变器并入电网,输出特性主要取决于逆变器的控制,逆变器控制分为电压型控制和电流型控制,由于电流型控制方式能对 DG 输出电流进行直接控制,因而得到普遍应用。其中, PQ 控制是典型的电流型控制方式,其控制系统的基本结构如图 1 所示。

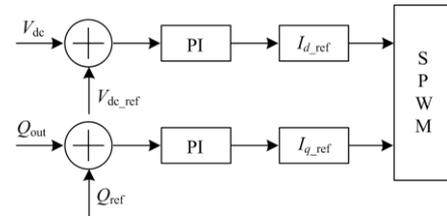


图 1 PQ 控制原理

Fig. 1 Principle of PQ control

从图 1 可知,控制器通过控制光伏直流侧输出电压 V_{dc} 跟踪参考电压 V_{dc_ref} 使得光伏输出有功功率达到有功参考功率;逆变器控制采用定电压矢量控制,将逆变器交流侧电压矢量定向于 d 轴,正常运行时 DG 控制方程可表示为

$$\begin{cases} P_{out} = U_d I_d \\ Q_{out} = U_d I_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{out} 、 Q_{out} 分别为有功功率和无功功率的实际输出值; U_d 为 IIDG 并网点电压; I_d 、 I_q 分别为 IIDG 有功电流和无功电流的实际输出值。

由式(1)可知,控制 I_d 、 I_q 分别跟踪电流参考值 I_{d_ref} 、 I_{q_ref} 即可输出有功参考功率 P_{ref} 、无功参考功率 Q_{ref} 。正常运行时,为了使分布式电源最大化利用,通常仅输出有功参考功率,将无功参考电流设置为 0。此时,分布式电源等值模型为

$$\begin{cases} I_d = I_{d_ref} = \frac{P_{ref}}{U_d} \angle 0^\circ \\ I_q = I_{q_ref} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

假设无外界因素影响, 分布式电源输出有功功率恒定不变, 正常运行时 IIDG 可等效为一压控电流源。

1.2 IIDG 故障控制特性与等值模型

配电网发生断线故障后, IIDG 并网点正序电压可能会出现较大的电压降落, 根据《分布式电源并网技术要求》规定, 直接接入 10 kV 公共电网的分布式电源应具有一定的低电压穿越能力, 根据德国故障穿越控制要求, 可建立如式(3)控制方程^[26]。

$$\begin{cases} I_{d_ref}^* = (K_p + \frac{K_I}{sT_d})(P_{ref.f} - P_{out.f}) \\ I_{q_ref}^* = I_{q(0)} + K_q \frac{\Delta U}{U_n} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $I_{d_ref}^*$ 、 $I_{q_ref}^*$ 分别为故障后 IIDG 有功电流指令值、无功电流指令值; $I_{q(0)}$ 为故障前 IIDG 输出的无功电流值; $P_{ref.f}$ 、 $P_{out.f}$ 分别为故障后 IIDG 有功参考功率和实际输出值; ΔU 、 U_n 分别为故障后 IIDG 并网点电压变化量、系统额定电压; K_p 、 K_I 为 PI 控制环节比例系数; T_d 为时间常数; K_q 为无功支持系数, 通常取 1.5。

根据 IIDG 并网点电压的大小可得故障情况下 IIDG 等值模型为

$$\begin{cases} I_{d.f} = \min \left\{ \frac{P_{ref}}{U_{d.f}}, \sqrt{I_{max}^2 - I_{q.f}^2} \right\} \\ I_{q.f} = \min \{ 1.5(0.9 - \gamma)I_N, I_{max} \} \\ I_{A.f} = \sqrt{I_{d.f}^2 + I_{q.f}^2} \\ \alpha = \arctan\left(\frac{I_{q.f}}{I_{d.f}}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I_{d.f}$ 、 $I_{q.f}$ 分别为故障后 IIDG 有功电流和无功电流的实际输出值; $U_{d.f}$ 为故障后 IIDG 并网点电压; I_N 为 IIDG 额定输出电流; $I_{A.f}$ 为故障后 IIDG 输出电流幅值; γ 为 IIDG 并网点电压跌落系数, 数值上等于并网点电压和系统额定电压的比值; I_{max} 为 IIDG 最大输出故障电流, 取正常运行时额定电流的两倍; α 为逆变器输出电流与并网点电压的夹角。

在断线故障情况下, 系统中会出现负序分量, 若采用常规的 PQ 控制策略, DG 输出的电流中会包含负序分量和大量的谐波分量。为了改善 DG 输出电流特性, 可采用正序分量控制策略, 将正负序电压电流分离, 分别采用 PI 调节器进行调节。在正序

分量控制策略中, 只需将 IIDG 故障等值模型中的并网点全电压用正序电压替换即可。

IIDG 并网点正序电压减小, 有功输出电流和无功输出电流均增大, 然而受逆变器容量限制, 其输出电流不能无限增大, 最大可取额定电流的两倍, 当 IIDG 输出电流未达到最大允许输出电流时, 有功功率按额定输出并输出一定的无功功率, 当 IIDG 输出电流达到最大允许输出电流时, 首先保证无功电流输出, 其次尽可能输出有功电流。

2 含 IIDG 配电网单相断线零序电压分析

2.1 含 IIDG 配电网单相断线故障分析模型

配电网发生断线故障后, 断口两侧三相对地电容不平衡将会导致线路对地零序电压不为零, 以图 2 进行零序电压分析, 忽略线路阻抗和系统阻抗。

图 2 为配电网单相断线故障接线图, 其中 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 分别为三相电源电势; \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 分别为系统侧母线三相电压; Z_A 、 Z_B 、 Z_C 及 Z_{Ai} 、 Z_{Bi} 、 Z_{Ci} ($i=1 \sim n$, 代表馈线条数, 最多为 n 条馈线) 为线路等效负载阻抗, 满足 $Z_A = Z_B = Z_C$, $Z_{Ai} = Z_{Bi} = Z_{Ci}$; \dot{U}_{OM} 为系统侧对地零序电压; \dot{U}_{ON} 、 \dot{U}_{ONi} 为负荷侧对地零序电压; C_A 、 C_B 、 C_C 及 C_{Ai} 、 C_{Bi} 、 C_{Ci} 为线路对地电容, 满足 $C_A = C_B = C_C$, $C_{Ai} = C_{Bi} = C_{Ci}$; DG 为逆变类分布式电源; f_1 、 f_2 分别为分布式电源上下游设置的故障。

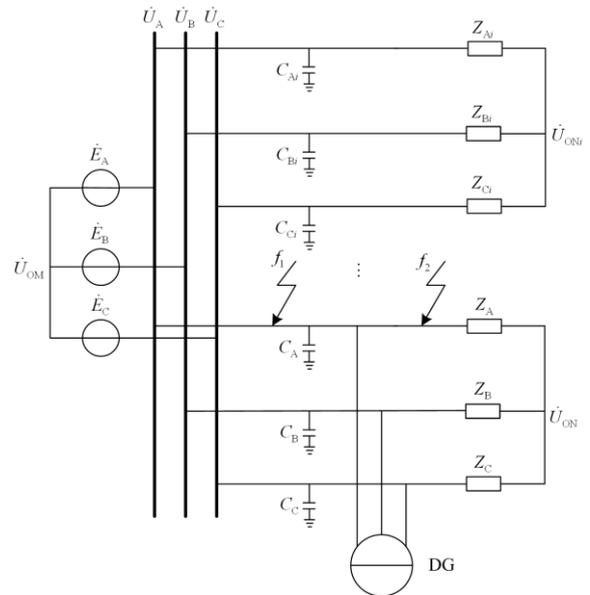


图 2 配电网单相断线故障接线图

Fig. 2 Diagram of single-phase disconnection faults in distribution system

2.2 IIDG 下游发生断线故障时零序电压分析

当 f_2 处发生 A 相断线不接地故障时, 得到故障等效电路图如图 3 所示。

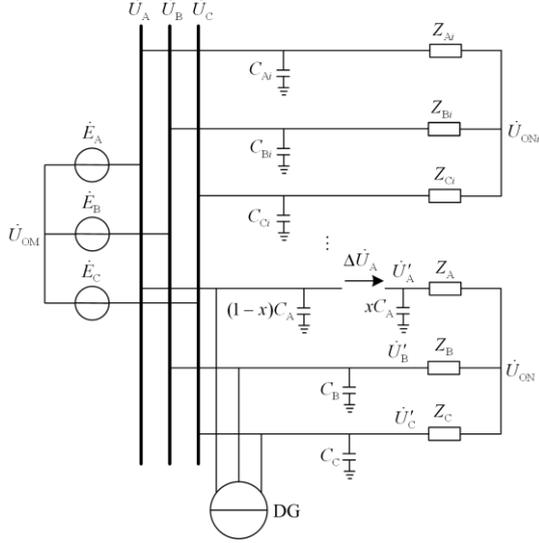


图 3 f_2 处发生 A 相断线不接地故障等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of a phase A disconnection and non-grounding fault at f_2

其中, \dot{U}'_A 、 \dot{U}'_B 、 \dot{U}'_C 分别为故障点处负荷侧的三相电压; $\Delta\dot{U}_A$ 为故障断口电压; x 为故障点距离负载阻抗的距离, 表示故障发生的位置。

可知断口两侧电压可表示为

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{E}_A + \dot{U}_{OM} \\ \dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{U}_{OM} \\ \dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{U}_{OM} \\ \dot{U}'_A = \dot{U}_A - \Delta\dot{U}_A \\ \dot{U}'_B = \dot{U}_B \\ \dot{U}'_C = \dot{U}_C \end{cases} \quad (5)$$

根据图 3 可知:

$$\begin{cases} \dot{U}_{OM} j\omega C_\Sigma + j\omega x C_A (\dot{U}'_A - \dot{U}_A) = 0 \\ \frac{\dot{U}'_A - \dot{U}_{ON}}{Z_A} + \frac{\dot{U}'_B - \dot{U}_{ON}}{Z_B} + \frac{\dot{U}'_C - \dot{U}_{ON}}{Z_C} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, C_Σ 为所有对地电容之和, 可表示为 $C_\Sigma = 3C_A + 3C_{A1} + 3C_{A2} + \dots + 3C_{An}$ 。

不考虑对地电容电流, 将 $\dot{U}'_A = 0$ 以及式(5)代入式(6)整理可得式(7)。

$$\begin{cases} \dot{U}_{OM} = \frac{x}{2} \cdot \frac{3C_A}{C_\Sigma} \dot{E}_A \\ \dot{U}_{ON} = \left(\frac{x}{2} \cdot \frac{3C_A}{C_\Sigma} - \frac{1}{2} \right) \dot{E}_A \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知, 当 IIDG 下游发生单相断线不接地故障时, 故障两侧零序电压不受分布式电源的影响; 当配电网有多条馈线时, 零序电压变化趋势不变, 仅数值减小。假设只有一条馈线, 即 $C_\Sigma = 3C_A$, x 取值范围为[0,1], 绘制系统侧零序电压向量图如图 4 所示。



图 4 IIDG 下游发生单相断线不接地故障时零序电位分布
Fig. 4 Zero sequence potential distribution when single-phase disconnection and non-earth fault occurs downstream of IIDG

如图 4 所示, 系统侧中性点位于 $\frac{1}{2}\dot{E}_A$ 上, 随着 x 从 0(故障点位于故障支路末端)到 1(假设只有故障支路一条线路且故障发生在支路首端), 系统侧中性点电压(零序电压)幅值从 0 增大到 $\frac{1}{2}E_A$, 相位与 A 相电源电势同相位, 断口两侧零序电压差为 $\frac{1}{2}\dot{E}_A$ 。

当 f_2 处发生 A 相断线且电源侧接地故障时

$$\begin{cases} \dot{U}_{OM} j\omega C_\Sigma + j\omega x C_A (\dot{U}'_A - \dot{U}_A) + \frac{\dot{U}_A}{R_g} = 0 \\ \frac{\dot{U}'_A - \dot{U}_{ON}}{Z_A} + \frac{\dot{U}'_B - \dot{U}_{ON}}{Z_B} + \frac{\dot{U}'_C - \dot{U}_{ON}}{Z_C} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, R_g 为接地电阻。

将 $\dot{U}'_A = 0$ 以及式(5)代入式(8)整理可得

$$\begin{cases} \dot{U}_{OM} = \frac{3/2 - 1/(j\omega x C_A R_g)}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} \dot{E}_A \\ \dot{U}_{ON} = \left(\frac{3/2 - 1/(j\omega x C_A R_g)}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} - \frac{1}{2} \right) \dot{E}_A \end{cases} \quad (9)$$

令 $C_\Sigma = 3C_A$, x 取值范围为[0,1], 绘制系统侧零序电压向量图如图 5 所示。

当配网发生单相断线电源侧接地故障时, 随着 x 从 0 到 1, 系统侧中性点位于直径为 $E_A \sim \frac{3}{2}E_A$ 之

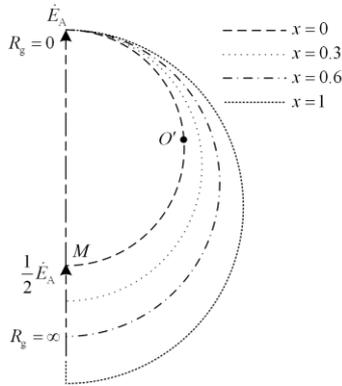


图 5 IIDG 下游发生单相断线且电源侧接地故障时零序电位分布

Fig. 5 Zero sequence potential distribution when single-phase disconnection and ground fault on the power supply side occurs downstream of IIDG

间所有半圆之上, 随着故障位置 x 的增大, 半圆直径增大; 幅值为 $0 \sim E_A$, 相位超前 A 相电源电势 $0^\circ \sim 180^\circ$, 断口两侧零序电压差为 $\frac{1}{2} \dot{E}_A$ 。

当 f_2 处发生 A 相断线且负荷侧接地故障时, 有

$$\begin{cases} \dot{U}_{OM} j\omega C_\Sigma + j\omega x C_A (\dot{U}'_A - \dot{U}_A) + \frac{\dot{U}'_A}{R_g} = 0 \\ \frac{\dot{U}'_A - \dot{U}_{ON}}{Z_A} + \frac{\dot{U}'_B - \dot{U}_{ON}}{Z_B} + \frac{\dot{U}'_C - \dot{U}_{ON}}{Z_C} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

将 $\dot{U}'_A = 0$ 以及式(5)代入式(10)整理得到式(11)。

$$\begin{cases} \dot{U}_{OM} = \frac{3/2 + 1/(j2\omega x C_A R_g)}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} \dot{E}_A \\ \dot{U}_{ON} = \left(\frac{3/2 + 1/(j2\omega x C_A R_g)}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} - \frac{1}{2} \right) \dot{E}_A \end{cases} \quad (11)$$

令 $C_\Sigma = 3C_A$, x 取值范围为 $[0, 1]$, 绘制系统侧零序电压向量图如图 6 所示。

当配网发生单相断线且负荷侧接地故障时, 随着 x 从 0 到 1, 系统侧中性点位于直径为 $\frac{1}{2} E_A \sim 0$ 之间所有半圆之上, 中性点电压(零序电压)幅值为 $0 \sim \frac{1}{2} E_A$, 相位滞后 A 相电源电势 $0 \sim 90^\circ$, 断口两侧零序电压差为 $\frac{1}{2} \dot{E}_A$ 。

2.3 IIDG 上游发生断线故障时零序电压分析

当 f_1 处发生 A 相断线故障时, 其并网点正序电压为

$$\dot{U}_{PCC,f} = \frac{1}{2} \dot{E}_A + \frac{1}{2} Z_A \dot{I}_{DG,f} \quad (12)$$

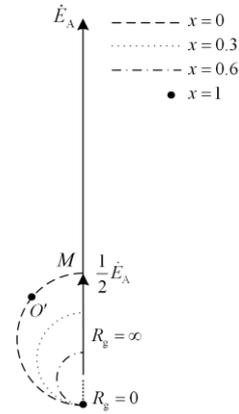


图 6 IIDG 下游发生单相断线且负荷侧接地故障时零序电位分布

Fig. 6 Zero sequence potential distribution when single-phase disconnection and ground fault on load side occurs downstream of IIDG

式中: $\dot{U}_{PCC,f}$ 表示 IIDG 并网点正序电压; $\dot{I}_{DG,f}$ 表示分布式电源输出的正序电流。

由式(12)可知, 分布式电源接入点正序电压与负荷以及它本身的输出特性有关, 不考虑负载阻抗的影响, IIDG 并网点正序电压受 IIDG 额定容量的影响。当 IIDG 额定容量较小时, 并网点正序电压小于 $0.9E_A$, 此时 IIDG 输出一定无功功率支撑系统电压, 分布式电源输出电流滞后其并网点正序电压一定角度; 当 IIDG 额定容量较大时, 并网点正序电压大于 $0.9E_A$, IIDG 只输出有功功率, 分布式电源输出电流与其并网点正序电压同相位。

当 f_1 处发生 A 相断线不接地故障时, 得到故障等效电路图如图 7 所示。

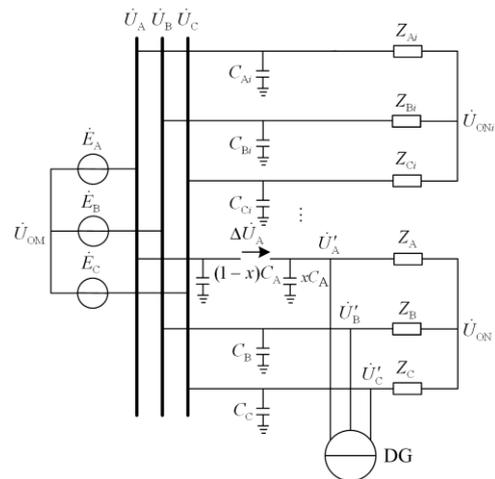


图 7 f_1 处发生 A 相断线不接地故障等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuit diagram of a phase A disconnection and non-grounding fault at f_1

将 $\dot{U}'_A = I_{DG_A} Z_A + \dot{U}_{ON}$ 代入式(6)整理可得式(13)。

$$\begin{cases} \dot{U}_{OM} = \frac{x}{2} \cdot \frac{3C_A}{C_\Sigma} \dot{E}_A - \frac{x}{2} \cdot \frac{3C_A}{C_\Sigma} Z_A \dot{i}_{DG_A} \\ \dot{U}_{ON} = \left(\frac{x}{2} \cdot \frac{3C_A}{C_\Sigma} - \frac{1}{2}\right) \dot{E}_A - \left(\frac{x}{2} \cdot \frac{3C_A}{C_\Sigma} - \frac{1}{2}\right) Z_A \dot{i}_{DG_A} \end{cases} \quad (13)$$

式中, \dot{i}_{DG_A} 为分布式电源 A 相输出电流。由于分布式电源仅输出正序分量, 因此存在:

$$\dot{i}_{DG_A} = \dot{i}_{DG.f} \quad (14)$$

令 $C_\Sigma = 3C_A$, x 取值范围为[0,1], 绘制系统侧零序电压向量图如图 8 所示。

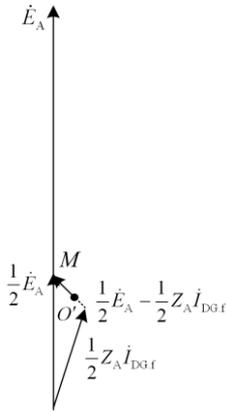


图 8 IIDG 上游发生单相断线不接地故障时零序电位分布
Fig. 8 Zero sequence potential distribution when single-phase disconnection and non-earth fault occurs upstream of IIDG

将 $\dot{U}'_A = I_{DG_A} Z_A + \dot{U}_{ON}$ 代入式(8)整理可得到 IIDG 上游发生单相断线电源侧接地故障情况下断口两侧零序电压:

$$\begin{cases} \dot{U}_{OM} = \frac{3/2 - 1/(j\omega x C_A R_g)}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} \dot{E}_A - \frac{3/2 Z_A \dot{i}_{DG.f}}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} \\ \dot{U}_{ON} = \left(\frac{3/2 - 1/(j\omega x C_A R_g)}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} - \frac{1}{2}\right) \dot{E}_A - \left(\frac{3/2}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} - \frac{1}{2}\right) Z_A \dot{i}_{DG.f} \end{cases} \quad (15)$$

令 $C_\Sigma = 3C_A$, x 取值范围为[0,1], 绘制系统侧零序电压向量图如图 9 所示。

将 $\dot{U}'_A = I_{DG_A} Z_A + \dot{U}_{ON}$ 代入式(10)整理可得到 IIDG 上游发生单相断线负荷侧接地故障情况下断口两侧零序电压:

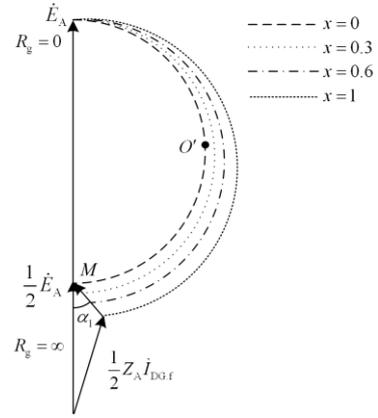


图 9 IIDG 上游发生单相断线且电源侧接地故障时零序电位分布

Fig. 9 Zero sequence potential distribution when single-phase disconnection and ground fault on the power supply side occurs upstream of IIDG

$$\begin{cases} \dot{U}_{OM} = \frac{3/2 + 1/(j2\omega x C_A R_g)}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} \dot{E}_A - \frac{3/2 Z_A \dot{i}_{DG.f} (1 + 1/(j\omega x C_A R_g))}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} \\ \dot{U}_{ON} = \left(\frac{3/2 + 1/(j2\omega x C_A R_g)}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} - \frac{1}{2}\right) \dot{E}_A - \left(\frac{3/2(1 + 1/(j\omega x C_A R_g))}{(3/x) \cdot (C_\Sigma / 3C_A) + 1/(j\omega x C_A R_g)} - \frac{1}{2}\right) Z_A \dot{i}_{DG.f} \end{cases} \quad (16)$$

令 $C_\Sigma = 3C_A$, x 取值范围为[0,1], 绘制系统侧零序电压向量图如图 10 所示。

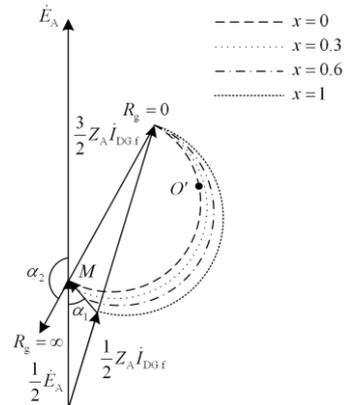


图 10 IIDG 上游发生单相断线且负荷侧接地故障时零序电位分布

Fig. 10 Zero sequence potential distribution when single-phase disconnection and ground fault on load side occurs upstream of IIDG

当 IIDG 上游发生单相断线故障时, 系统侧零序电压(中性点电压)的变化规律为

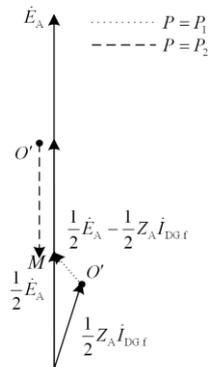
1) 当发生单相断线不接地故障时, 系统侧中性点位于 $\frac{1}{2}\dot{E}_A - \frac{1}{2}Z_A \dot{i}_{DG,f}$ 上, 随着 x 从 0 到 1, 中性点电压幅值从 0 增大到 $\left| \frac{1}{2}\dot{E}_A - \frac{1}{2}Z_A \dot{i}_{DG,f} \right|$, 相位超前 \dot{E}_A 的角度取决于电网功率因数和光伏额定容量, 断口两侧零序电压差为 $\frac{1}{2}\dot{E}_A - \frac{1}{2}Z_A \dot{i}_{DG,f}$ 。

2) 当发生单相断线电源侧接地故障时, 随着 x 从 0 到 1, 系统侧中性点位于直径为 $|\dot{E}_A| \sim \left| \frac{3}{2}\dot{E}_A - \frac{1}{2}Z_A \dot{i}_{DG,f} \right|$ 之间所有半圆之上, 中性点电压幅值为 $0 \sim E_A$, 相位超前 $\dot{E}_A \alpha_1 \sim 180^\circ$, α_1 与电网功率因数和光伏额定容量有关, 断口两侧零序电压差为 $\frac{1}{2}\dot{E}_A - \frac{1}{2}Z_A \dot{i}_{DG,f}$ 。

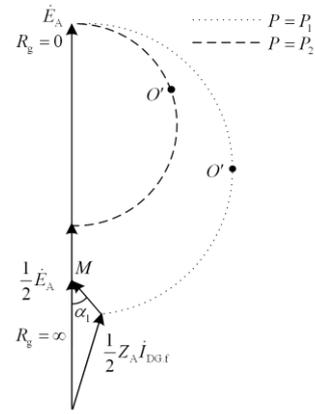
3) 当发生单相断线负荷侧接地故障时, 随着 x 从 0 到 1, 系统侧中性点位于直径为 $\left| \frac{1}{2}\dot{E}_A - \frac{3}{2}Z_A \dot{i}_{DG,f} \right| \sim |Z_A \dot{i}_{DG,f}|$ 之间所有半圆之上, 中性点电压幅值为 $0 \sim \left| \frac{1}{2}\dot{E}_A - \frac{3}{2}Z_A \dot{i}_{DG,f} \right|$, 相位超前 $\dot{E}_A \alpha_1 \sim \alpha_2$, α_1 、 α_2 与电网功率因数和光伏额定容量有关, 断口两侧零序电压差为 $\frac{1}{2}\dot{E}_A - \frac{1}{2}Z_A \dot{i}_{DG,f}$ 。

2.4 IIDG 额定容量对零序电压的影响分析

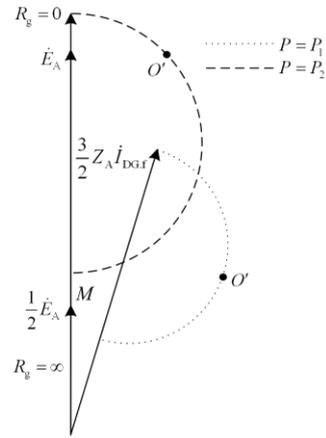
当 IIDG 额定容量较大时, 并网点正序电压可能大于 $0.9E_A$, IIDG 只输出有功功率, 假设负荷阻抗不变, $x=1$, 系统侧零序电压向量图如图 11 所示。其中, P_1 为 IIDG 并网点正序电压小于 $0.9E_A$ 时 IIDG 输出有功功率, P_2 为 IIDG 并网点正序电压大于 $0.9E_A$ 时 IIDG 输出有功功率。



(a) IIDG 不同额定容量下单相断线且不接地时地电位分布



(b) IIDG 不同额定容量下单相断线且电源侧接地时地电位分布



(c) IIDG 不同额定容量下单相断线且负荷侧接地时地电位分布

图 11 IIDG 不同额定容量下单相断线地电位分布

Fig. 11 Ground potential distribution of single-phase disconnection under different rated capacity of IIDG

假设负荷阻抗不变且 $x=1$, 当 P 等于 P_1 时, 零序电压分布规律如 2.3 节分析所示; 当 P 等于 P_2 时, IIDG 只输出有功功率, 输出电流相位不变, 零序电压轨迹与 IIDG 下游发生故障时的零序电压轨迹相似, 均无角度的偏移。随着光伏输出容量的增大, 零序电压幅值先减小后增大(或一直增大)。

本节分析了 IIDG 上下游分别发生不同断线故障形态时, 接地电阻、故障发生位置以及 IIDG 额定容量对断线故障系统侧零序电压分布的影响。分析结果可知, IIDG 对其下游故障零序电压无影响, 断线不接地故障时为一直线, 断线且接地故障时为一半圆, 随着故障发生位置的不同, 零序电压轨迹分布位置发生变化; IIDG 对其上游故障零序电压分布存在影响, 使得零序电压轨迹分布整体发生偏移, 其轨迹依旧为半圆或不完整半圆。

3 仿真验证

为了验证本文分析结果的正确性, 基于 Matlab/Simulink 建立了如图 12 所示的 10 kV 配电网仿真模型。110 kV 高压电网, 经 110 kV/10 kV 变压器接入 10 kV 配电网, 线路 AE、AB、AC+CD 长度分别为 5 km、6 km、10 km, 负载阻抗 $Z_{L1}=150 \Omega$ 、 $Z_{L2}=100 \Omega$ 、 $Z_{L3}=50 \Omega$, 线路参数为正序阻抗 $Z_1=(0.17+j0.38) \Omega/\text{km}$, 正序容纳 $B_1=3.045 \mu\text{S}/\text{km}$, 零序阻抗 $Z_0=(0.23+j1.72) \Omega/\text{km}$, 零序容纳 $B_0=1.884 \mu\text{S}/\text{km}$ 。接地方式为中性点不接地, DG 采用光伏模型, 采用最大功率跟踪控制方式, 逆变器采用电流型控制方式, 接于母线 C 处, 其容量为 1 MW。

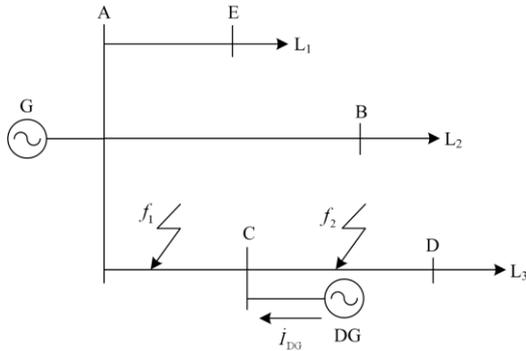


图 12 10 kV 配电网仿真模型

Fig. 12 10 kV distribution network simulation model

正常运行时, IIDG 接于线路 AD 的二分之一处, IIDG 按额定容量输出有功功率, 无功功率输出为 0, 配电网各节点正序电压仿真结果如表 1 所示。

表 1 稳态时配电网各节点正序电压及 IIDG 输出电流

Table 1 Positive sequence voltage of each node of the distribution network and output current of IIDG in steady state

\dot{U}_{A1}/V	\dot{U}_{B1}/V	\dot{U}_{C1}/V	\dot{U}_{D1}/V	i_{DG}/A
$8163\angle$	$8078\angle$	$8084\angle$	$7944\angle$	$79.10\angle$
-0.160°	-1.453°	-1.191°	-3.332°	-1.769°

其中, \dot{U}_{A1} 、 \dot{U}_{B1} 、 \dot{U}_{C1} 、 \dot{U}_{D1} 分别为节点 A、B、C、D 正序电压; i_{DG} 为 IIDG 输出电流。图 13 为故障前后 IIDG 输出电流的 d 、 q 轴分量及相应的给定。

从图 13 可以看出, 正常运行 PQ 控制下的 IIDG 有功输出功率可以很好地跟随给定值, 无功功率为零; 当 IIDG 额定容量较小时 ($P=1 \text{ MW}$), IIDG 不仅输出有功功率, 还会输出一定的无功功率; 当 IIDG 容量较大时 ($P=3 \text{ MW}$), IIDG 仅输出有功功率, 与 2.3 节分析一致。

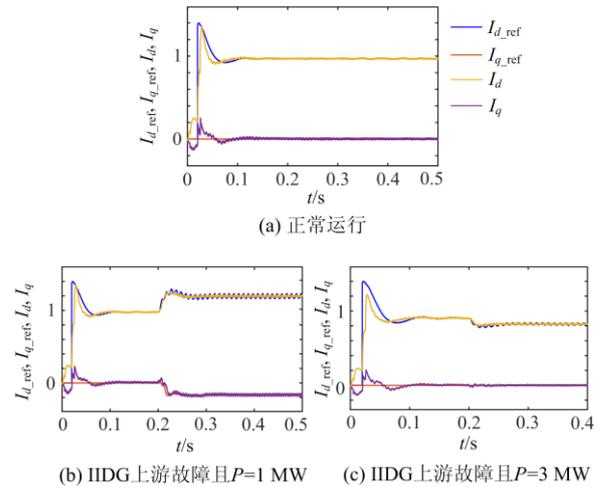


图 13 IIDG 输出电流特性

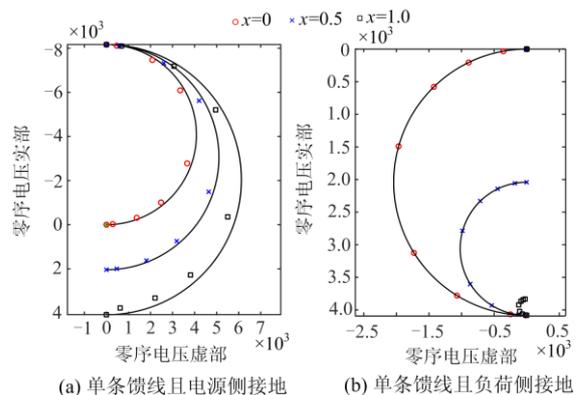
Fig. 13 Output current characteristics of IIDG

3.1 含 IIDG 配电网单相断线零序电压仿真分析

当 f_1 处发生断线故障时, 设置 $AC=10 \text{ km}$, $CD=0 \text{ km}$; 当 f_2 处发生断线故障时, 设置 $AC=0 \text{ km}$, $CD=10 \text{ km}$, 分别以 A 相发生单相断线不接地、断线且电源侧接地、断线且负荷侧接地故障为例, 设置不同故障位置 ($x=0, 0.5, 1$) 与不同接地电阻 (0Ω 、 $1 \text{ k}\Omega$ 、 $5 \text{ k}\Omega$ 、 $10 \text{ k}\Omega$ 、 $25 \text{ k}\Omega$ 、 $50 \text{ k}\Omega$ 、 $100 \text{ k}\Omega$ 、 $500 \text{ k}\Omega$ 与无穷大), 系统侧零序电压仿真结果如图 14、图 15 所示。

图 14 为 IIDG 下游 f_2 处发生单相断线故障时, 系统侧零序电压仿真结果及轨迹图。其中, 图 14(a)、图 14(b) 为仅有一条馈线 AD 时的故障仿真结果; 图 14(c)、图 14(d) 为有三条馈线时的仿真结果。图中三种不同形态的点分别代表了故障位置 $x=0, 0.5$ 和 1 时, 系统侧测得的零序电压, 不同形态的点对应的黑色曲线则为利用本文公式绘制的零序电压轨迹图。

从图 14 可以看出, 仿真所测数据和理论分析结果基本吻合, 当配电网有多条馈线时, 零序电压变化趋势不变, 幅值减小, 和理论分析一致。



(a) 单条馈线且电源侧接地

(b) 单条馈线且负荷侧接地

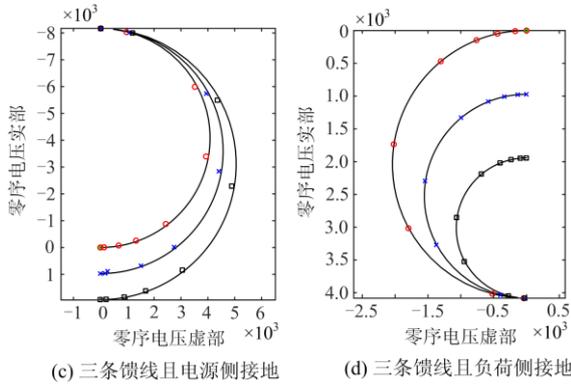


图 14 IIDG 下游发生单相断线故障时系统侧零序电压分布
Fig. 14 Zero-sequence voltage distribution on the system side when a single-phase disconnection fault occurs downstream of IIDG

图 15 为 IIDG 上游 f_1 处发生单相断线故障时, 系统侧零序电压仿真结果及轨迹图。

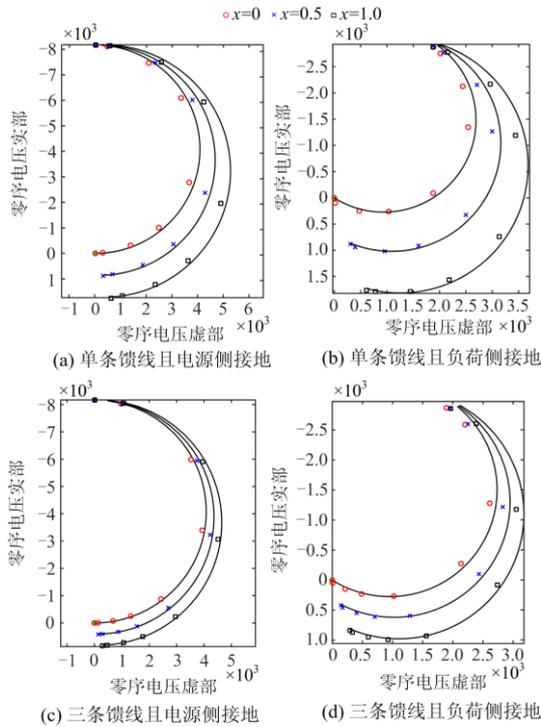


图 15 IIDG 上游发生单相断线故障时系统侧零序电压分布
Fig. 15 Zero-sequence voltage distribution on the system side when a single-phase disconnection fault occurs upstream of the IIDG

从图 15 可以看出, 仿真所测数据和理论分析结果基本吻合。

IIDG 接于相邻馈线 AB 二分之一处且线路 AD 上不同位置发生断线故障时, 得到仿真数据和理论结果如图 16 所示。

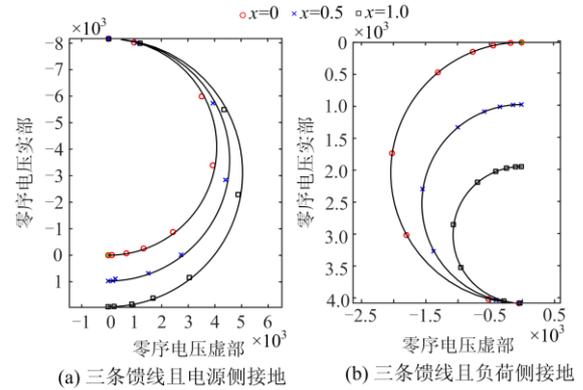


图 16 IIDG 相邻馈线发生单相断线故障时系统侧零序电压分布

Fig. 16 Zero-sequence voltage distribution on the system side when a single-phase disconnection fault occurs on the adjacent feeder of IIDG

从图中可以看出, 零序电压轨迹和 IIDG 下游发生单相断线故障时相似, 均不受分布式电源的影响。

仿真还得到了不同故障情况下的故障两侧零序电压差及 IIDG 输出特性。仿真结果显示, 故障两侧零序电压差和 IIDG 输出电流仅与故障位置和 IIDG 接入的相对位置有关, 与故障形态无关。表 2 为只有单条馈线 AD 时, 故障两侧零序电压差及 IIDG 输出电流。

表 2 单条馈线系统故障两侧零序电压差及 IIDG 输出特性
Table 2 Zero sequence voltage difference on both sides of the fault and the IIDG output characteristics of a single feeder system

故障点	\dot{U}_0 / V	$\dot{U}_{\text{PCCf}} / \text{V}$	$\dot{I}_{\text{DG,R(1)}} / \text{A}$	$\dot{I}_{\text{DG,R(2)}} / \text{A}$
f_2	$4082 \angle 0^\circ$	$8163 \angle -0.063^\circ$	$78.44 \angle -0.466^\circ$	$0.195 \angle 75.33^\circ$
f_1	$1863 \angle 19.25^\circ$	$6437 \angle -6.857^\circ$	$98.52 \angle -15.36^\circ$	$2.489 \angle 145.7^\circ$

其中, \dot{U}_0 为故障两侧零序电压差; $\dot{I}_{\text{DG,R(1)}}$ 、 $\dot{I}_{\text{DG,R(2)}}$ 分别为 IIDG 输出正序电流、负序电流。

表中数据显示采用正负序分离控制的 IIDG 只输出正序电流, 负序电流接近 0; 当 IIDG 下游发生单相断线故障时, IIDG 按额定电流输出, 其输出特性对零序电压差无影响, 理论计算故障两侧零序电压差为 $4082.5 \angle 0^\circ$; 当 IIDG 上游发生单相断线故障时, IIDG 并网点正序电压降落, IIDG 输出一定无功功率支撑系统电压, 其输出特性会减小故障两侧零序电压差幅值, 并使其相位超前电源电压, 理论计算故障两侧零序电压差为 $1827.9 \angle 20.91^\circ$, 幅值误差仅为 1.88%, 仿真验证了理论分析的正确性。

3.2 IIDG 额定容量对零序电压影响仿真分析

由 3.1 节仿真结果可知, 当 IIDG 下游发生断线故障时, IIDG 对其并无影响。因此, 以图 12 所示三条馈线系统为例, 设置 f_1 处($x=1$)发生单相断线不接地、断线且电源侧接地、断线且负荷侧接地故障, 设置不同接地电阻(0Ω 、 $1 \text{ k}\Omega$ 、 $5 \text{ k}\Omega$ 、 $10 \text{ k}\Omega$ 、 $25 \text{ k}\Omega$ 、 $50 \text{ k}\Omega$ 、 $100 \text{ k}\Omega$ 、 $500 \text{ k}\Omega$ 与无穷大), IIDG 额定容量分别为 1 MW 、 3 MW , 得到仿真结果如图 17 所示。

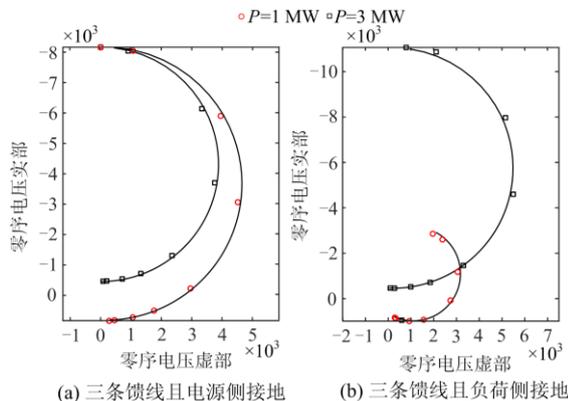


图 17 IIDG 不同额定容量下系统侧零序电压分布图

Fig. 17 Distribution diagram of zero sequence voltage on system side under different rated capacity of IIDG

由图 17 可以看出, 仿真得到的结果和理论分析结果吻合, 其变化趋势和图 11 一致。

4 结论

IIDG 接入配电网会对配电网零序电压及断口两侧零序电压差产生影响。当 IIDG 下游发生单相断线故障时, 由于系统电源的支撑, IIDG 并网点正序电压等于系统电源电压, IIDG 只输出有功功率且对配电网零序电压及断口两侧零序电压差均无影响。

当 IIDG 上游发生单相断线故障时, 其对配网各节点零序电压及断口两侧零序电压差均产生影响, IIDG 在正序分量控制下只输出正序电流, 当 IIDG 额定容量较小时, 其输出特性会降低断口两侧零序电压差的幅值, 因此降低了以零序电压差为保护的動作灵敏度。本文分析结果可为含 IIDG 配电网单相断线故障识别及定位提供理论依据。

参考文献

[1] 徐丙垠. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
 [2] 张慧芬, 桑在中. 架空线单相断线接地复故障分析[J]. 中国电力, 2013, 46(2): 65-71.
 ZHANG Huifen, SANG Zaizhong. Analysis of single-phase grounding fault with line-broken on overhead transmission lines[J]. Electric Power, 2013, 46(2): 65-71.

[3] RAHMAN F A, VARUTTAMASENI A, KINTNER-MEYER M, et al. Application of fault tree analysis for customer reliability assessment of a distribution power system[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 111: 76-85.
 [4] KANWAR N, GUPTA N, NIAZI K R, et al. Optimal distributed generation allocation in radial distribution systems considering customer-wise dedicated feeders and load patterns[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4): 475-484.
 [5] 周成瀚, 邹贵彬, 杜肖功, 等. 基于正序电流故障分量的有源配电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2102-2112, 2390.
 ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, DU Xiaogong, et al. A pilot protection method based on positive sequence fault component current for active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2102-2112, 2390.
 [6] 王开科, 熊小伏, 肖扬, 等. 基于负序电流的主动配电网单相断线故障保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 10-18.
 WANG Kaike, XIONG Xiaofu, XIAO Yang, et al. Single-phase break fault protection method for an active distribution network based on negative sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 10-18.
 [7] 彭生江, 陆军, 张中丹, 等. 光伏接入对电网的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 157-164.
 PENG Shengjiang, LU Jun, ZHANG Zhongdan, et al. Research on the influence of photovoltaic access on a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 157-164.
 [8] HAN B, LI H, WANG G, et al. A virtual multi-terminal current differential protection scheme for distribution networks with inverter-interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5418-5431.
 [9] CASAGRANDE E, WOON W L, ZEINELDIN H H, et al. A differential sequence component protection scheme for microgrids with inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 29-37.
 [10] CHEN G, Y LIU, YANG Q. Impedance differential protection for active distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 25-36.
 [11] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变器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] 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 on distribution network with inverter interfaced

- distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [13] 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.
- [14] 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, 36(18): 92-96, 108.
- WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Fault analysis method of distribution network taking into account the control characteristics of inverter-type distributed power sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 92-96, 108.
- [15] 黄伟, 雷金勇, 夏翔, 等. 分布式电源对配电网相间短路保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 93-97.
- HUANG Wei, LEI Jinyong, XIA Xiang, et al. Influence of distributed power sources on interphase short circuit protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 93-97.
- [16] 马晓博, 戚连锁. 分布式光伏电源对配电网短路电流和静态电压影响的仿真分析[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(1): 20-24, 80.
- MA Xiaobo, QI Liansuo. Simulation analysis on influences of distributed photovoltaic power short-circuit current and state voltage[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2016, 28(1): 20-24, 80.
- [17] 刘健, 林涛, 同向前, 等. 分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2080-2085.
- LIU Jian, LIN Tao, TONG Xiangqian, et al. Simulation analysis on influences of distributed photovoltaic generation on short-circuit current in distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2080-2085.
- [18] 谭会征, 李永丽, 陈晓龙, 等. 带低电压穿越特性的逆变型分布式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 31-37, 52.
- TAN Hui Zheng, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Impact of inverter interfaced distributed generation with low voltage ride through characteristics on short circuit current of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 31-37, 52.
- [19] WANG L, GAO H, ZOU G. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 370-378.
- [20] LI H, DENG C, ZHANG Z, et al. An adaptive fault-component-based current differential protection scheme for distribution networks with inverter-based distributed generators[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 128.
- [21] 陈禾, 陈维贤. 配电网中性点位移现象[J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 26-27, 30.
- CHEN He, CHEN Weixian. Neutral displacement in distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(6): 26-27, 30.
- [22] 薛永端, 陈梦琦, 曹丽丽, 等. 不接地系统单相断线故障电压分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1322-1333.
- XUE Yongduan, CHEN Mengqi, CAO Lili, et al. Analysis of voltage characteristics of single-phase disconnection fault in ungrounded distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1322-1333.
- [23] 张洪涛, 曹丽丽, 冯光, 等. 谐振接地系统单相断线故障分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(2): 58-65.
- ZHANG Hongtao, CAO Lili, FENG Guang, et al. Analysis of single-phase open fault for resonant grounded system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(2): 58-65.
- [24] 刘健, 张志华, 王毅钊. 基于电压信息的配电网断线故障定位[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 123-131.
- LIU Jian, ZHANG Zhihua, WANG Yizhao. Fault location of disconnection in distribution network based on voltage information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 123-131.
- [25] 杜雪, 欧阳金鑫, 龙晓轩, 等. 基于分布式电源电流变化率的主动配电网单相断线保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 41-48.
- DU Xue, OUYANG Jinxin, LONG Xiaoxuan, et al. A protection method of a single-phase break fault for an active distribution network based on current change rates of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 41-48.
- [26] TROESTE E. New German grid codes for connecting PV systems to the medium voltage power grid[C] // 2nd International Workshop on Concentrating Photovoltaic Power Plants: Optical Design, Production, Grid Connection, 2009: 1-4.

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-10-29

作者简介:

徐岩(1976—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统保护与安全控制和新能源发电与智能电网; E-mail: xuyanhd@ncepu.edu.cn

邹南(1996—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与安全控制和新能源发电与智能电网; E-mail: zn@ncepu.edu.cn

马天祥(1986—), 男, 硕士, 高工, 研究方向为配电系统运行与控制、配网设备关键技术。E-mail: matianxiang1986@126.com

(编辑 魏小丽)