

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

谭会征¹, 李永丽¹, 陈晓龙¹, 赵曼勇^{2,3}, 刘 年², 黄维芳^{2,3}

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623;

3. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 逆变型分布式电源(IIDG)的大规模接入使得原有的配电网短路电流计算方法不再适用,这就给含 IIDG 配电网的继电保护整定带来了困难。在对 IIDG 的低电压穿越特性及控制策略分析的基础上,给出了含单个以及 2 个 IIDG 的配电网短路电流计算的通用方法。该方法将 IIDG 等效为只包含在正序网络中的压控电流源模型,并通过分析发生不同类型故障时含 IIDG 配电网的等效电路图或复合序网图,建立了短路电流计算方程,进而推导了短路电流计算公式。通过在 PSCAD 中进行建模仿真,验证了该方法的正确性。最后,根据推导得到的短路电流计算公式,利用 MATLAB 软件分析了含 IIDG 配电网短路电流随系统参数以及 IIDG 容量变化的一般规律。

关键词: 逆变型分布式电源; 配电网; 低电压穿越; 正序控制; 短路电流计算; 故障特性分析

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.005

0 引言

随着传统化石能源的逐步枯竭,以光伏电站和风力电站为代表的分布式电源 DG(Distributed Generator)技术将得到广泛的应用,并成为 21 世纪电力工业的主要发展方向。然而,DG 的接入将改变传统配电网单电源集中式的供电结构,也将对传统的继电保护造成影响^[1-3],主要表现在当系统发生故障时 DG 对故障支路短路电流的外汲或助增作用上。因此,含 DG 配电网的短路电流计算方法对含 DG 配电网保护的整定尤为重要。

按照不同的运行方式,一般可将 DG 分为传统旋转机型 DG 和逆变型 DG 即 IIDG(Inverter-Interfaced DG)^[4]。其中,IIDG 通过电力电子装置接入电网,是目前 DG 的主要形式^[5]。IIDG 通常采用基于电压正序分量的控制策略来提高输出电流的电能质量,能够根据系统的需求调节有功或无功输出,并且在系统发生故障时具备一定的低电压穿越 LVRT(Low Voltage Ride Through)能力。这些特性决定了含 IIDG 配电网的稳态故障分析方法要更加复杂。文献[6]在 DigSilent 软件中通过仿真分析了配电网发生故障时不同控制策略下的逆变器的输出特性,但时域仿真方法只能针对特定的线路参数进行分析,不能得到反映故障电流受 IIDG 接入位置、运行方式及故障点位置等不同因素影响的更具一般性的规律。文献[7-8]

针对 IIDG 的故障暂态特性及其对配电网的影响问题进行了研究,但是其研究的内容仅限于对称故障的情况,提出的 IIDG 等值模型也只适用于对称故障分析。文献[9]假设故障前后变流器功率不变,建立了 IIDG 的压控电流源模型,但当系统发生故障时,根据故障严重程度的不同,IIDG 会启动低电压控制策略,并不一定会保持输出有功的恒定。文献[10]详细推导了含 IIDG 配电网在发生对称及不对称故障时各支路短路电流的计算公式,但并没有进一步分析短路电流的影响因素及其变化规律,且该方法只适用于含单个 IIDG 的配电网。

根据国家标准及对 IIDG 生产厂家的实地调研,本文建立了带 LVRT 特性的 IIDG 的压控电流源模型及含 IIDG 的配电网对称及不对称故障分析模型,并且推导了故障达到稳态的情况下各支路短路电流计算公式,为含 IIDG 配电网电流保护的整定以及 IIDG 接入对电流保护影响的评估提供了依据。另外,根据短路电流计算公式,本文总结了含 IIDG 配电网的短路电流随故障类型、故障点位置、IIDG 并网点位置、IIDG 容量以及 IIDG 运行状态等因素变化的一般规律。下文中,电压、电流相量均用黑斜体表示,其模值以白斜体表示。

1 IIDG 的特点及控制策略

1.1 LVRT 特性

根据《光伏电站接入电网技术规范》^[11],光伏电站等 IIDG 需具备 LVRT 能力,即当电力系统事故或扰动引起光伏电站并网点的电压跌落时,在一定的电

收稿日期:2014-09-14;修回日期:2015-06-01

基金项目:南方电网公司重点科技项目(K-KY2013-116)

Project supported by the China Southern Power Grid Company Limited(K-KY2013-116)

压跌落范围和时间间隔内, IIDG 能够保证不脱网连续运行, 避免脱网引起电网运行情况的进一步恶化。

文献[12-13]提出了保持有功平衡的 LVRT 控制策略, 但并不能满足目前的无功控制要求; 文献[14]指出应根据电网电压跌落的深度计算无功电流参考值, 然后直接给定有功电流参考值, 但并未给出参考值的具体计算方法。

在 LVRT 期间, IIDG 需要根据并网点电压跌落程度输出一定的无功, 以支撑并网点电压。根据实际 IIDG 设备的低电压控制策略, 光伏电站注入电力系统的动态无功电流 I_{IIDG} 应实时跟踪并网点电压变化, 并应满足:

$$I_{\text{IIDG}} = \begin{cases} \frac{P_N}{3U^2} U & U \geq 0.9U_N \\ 2 \left(0.9 - \frac{U}{U_N} \right) I_N \frac{U}{U} \angle \left(-\frac{\pi}{2} \right) & 0.3U_N \leq U < 0.9U_N \\ 1.2I_N \frac{U}{U} \angle \left(-\frac{\pi}{2} \right) & U < 0.3U_N \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_N 和 U_N 分别为 IIDG 的额定功率和相电压额定值; I_N 为 IIDG 的额定输出电流; U 为 IIDG 并网点的实际电压相量, U 为其模值。

为叙述方便, 本文将式(1)所示的 IIDG 的 3 种运行状态命名为 3 种类型: 当故障位置较远或者发生非严重故障时, 并网点电压高于 0.9 p.u., 此时 IIDG 输出的有功功率保持不变, 称为恒功率态; 当故障位置较近或发生严重故障时, 并网点电压低于 0.3 p.u., 此时 IIDG 只输出无功电流且其大小为 1.2 倍的额定电流, 称为恒流态; 当并网点电压介于 0.3 p.u. 和 0.9 p.u. 之间时, IIDG 几乎只输出无功电流, 且该电流随并网点电压的变化而变化, 称为中间态。

1.2 基于电压正序分量的控制策略

当含 IIDG 配电网发生不对称故障时, 基于并网点电压矢量控制策略的 IIDG 的输出电流不仅包含负序分量, 还包含大量谐波分量, 这会严重降低电网的电能质量。为改善 IIDG 的输出特性, IIDG 通常采用基于电压正序分量的控制策略^[9-10], 即在配电网发生不对称故障时, IIDG 的控制系统将并网点电压的正序分量作为反馈量参与调节, 以保证 IIDG 的输出电流中只含正序分量, 改善故障情况下的电能质量。

2 短路电流公式推导

本文以如图 1 所示的含 IIDG 配电网为例进行短路电流的计算和分析。图 1 中, E_s 和 Z_s 分别为系统等值电势和内阻; Z_{AB} 、 Z_{BC} 、 Z_{CD} 和 Z_{AE} 为各支路阻抗。

由于故障发生位置和故障类型的多样性, 本文分别以在含单个 IIDG 配电网、含 2 个 IIDG 配电网典型位置发生故障的情况为例进行详细分析, 来说明含

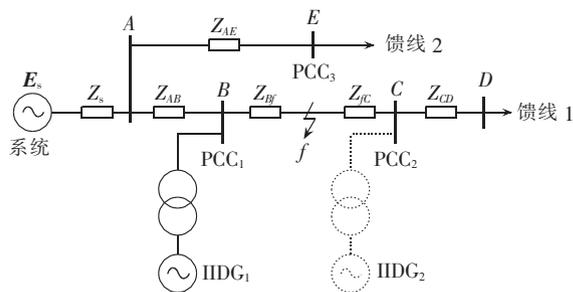


图 1 配电网典型拓扑结构

Fig.1 Typical topology of distribution network

IIDG 配电网的故障分析方法。

2.1 单个 IIDG 接入配电网时的短路电流计算

2.1.1 IIDG 下游线路发生三相短路故障

当 IIDG 接入 PCC₁ 且其下游线路发生三相故障时, 忽略相邻馈线 AE 上的线路阻抗及负荷阻抗, 则图 1 所示的拓扑结构可以简化为如图 2 所示的等效电路图, 其中, $Z_1 = Z_{AB} + Z_s = Z_1 \angle \alpha_1$, $Z_2 = Z_{BC} = Z_2 \angle \alpha_2$ 。

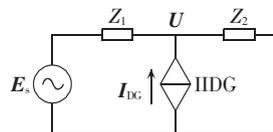


图 2 单 IIDG 下游发生三相故障时配电网等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of distribution network with three-phase fault at down-stream of single IIDG

根据图 2, 利用节点电压法得到下式:

$$(1/Z_1 + 1/Z_2)U = E_s/Z_1 + I_{\text{DC}} \quad (2)$$

当并网点电压跌落程度不同时, IIDG 的运行状态也不同, 相应的 I_{DC} 也不相同。根据上文介绍的 IIDG 的 LVRT 特性, 将式(1)中 IIDG 的输出电流公式分别代入式(2)中, 能够得到 3 种不同的 IIDG 运行状态下并网点的电压矢量 U , 从而得到流过 IIDG 下游线路的短路电流 I_2 为:

$$I_2 = U/Z_2 \quad (3)$$

流过 IIDG 上游线路的短路电流 I_1 为:

$$I_1 = (E_s - U)/Z_1 \quad (4)$$

上文给出了不同 IIDG 运行状态下的含 IIDG 配电网的短路电流计算方法。需要指出的是, 即使在同一种故障情况下, 不同的 IIDG 运行状态也会导致不同的 PCC 电压跌落程度, 所以在实际计算含 IIDG 配电网短路电流时, 首先需要通过分析 PCC 的电压跌落程度来确定 IIDG 运行于何种控制策略。当配电网没有发生故障时, IIDG 运行于恒功率态。故障发生后瞬间 IIDG 维持恒功率运行状态不变, 并以此计算此时的 PCC 正序电压有效值; 如果 PCC 正序电压有效值大于 90% 的额定电压, 则判定 IIDG 运行于恒功率态; 如果 PCC 正序电压有效值小于 30% 的额定电压, 则 IIDG 将最终运行于恒流态; 如果 PCC 正序电压有效值在 30%~90% 的额定电压范围内, 则可以

先令 IIDG 运行于中间态,由于 IIDG 的控制策略由恒功率态切换为中间态后,其输出电流减小,会导致 PCC 电压降低,所以需要重新计算此时的 PCC 电压,如果 IIDG 的控制策略切换后 PCC 正序电压有效值降低至 30% 的额定电压以下,则判定 IIDG 最终运行于恒流态,否则判定 IIDG 继续运行于中间态。

2.1.2 单个 IIDG 上游相间故障

当 IIDG 接入 PCC₂ 且 f 点发生 BC 相间故障时,其序网图如图 3 所示。图中,上标(1)、(2)分别表示正序分量和负序分量,后同。令 $Z_1=Z_s+Z_{AB}+Z_{Bf}$ 、 $Z_2=Z_{fC}$ 。对于这种非对称故障的情况,需要采用对称分量法进行分析。由于 IIDG 采用正序分量控制策略,其输出的故障电流只包含正序分量。因此,IIDG 的接入只会对正序网络产生影响。

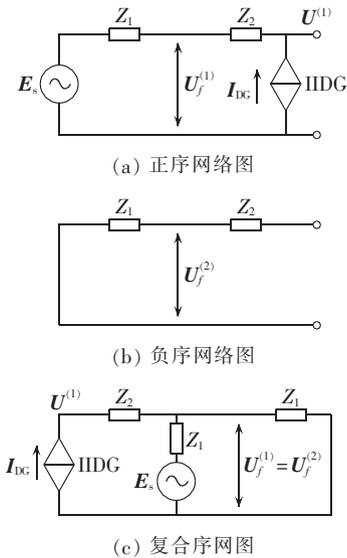


图 3 单 IIDG 上游相间故障序网图

Fig.3 Sequence network of inter-phase fault at up-stream of single IIDG

图 3(c)所示的复合序网图可简化为图 4 形式。

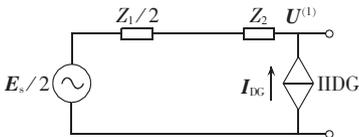


图 4 单 IIDG 上游相间故障复合序网简化图

Fig.4 Simplified compound-sequence network of inter-phase fault at up-stream of single IIDG

由图 4 可得下式:

$$U^{(1)} - E_s/2 = I_{DC}(Z_2 + Z_1/2) \quad (5)$$

由上式可知,当没有 IIDG 接入配电网,即 $I_{DC}=0$ 时,满足 $U^{(1)}=E_s/2$,当 IIDG 接入配电网后,并网点正序电压将增大。因此,当 IIDG 上游线路发生两相故障时,IIDG 不可能运行于恒流态,只需对 IIDG 运行于恒功率态和中间态的情况进行分析。

将式(1)中恒功率态和中间态 2 种情况下的 IIDG

输出电流代入式(5),即可以得到 IIDG 运行于恒功率态和中间态时并网点正序电压相量。再根据图 4 能够得到故障点正、负序电压 $U_f^{(1)}$ 、 $U_f^{(2)}$ 及故障点上游的正、负序电流 $I_1^{(1)}$ 、 $I_1^{(2)}$,可以得到故障点上游流过系统侧的三相电流。

$$U_f^{(1)} = U_f^{(2)} = U^{(1)} - Z_2 I_{DC}^{(1)} \quad (6)$$

$$\begin{cases} I_1^{(1)} = (E_s - U_f^{(1)})/Z_1 \\ I_1^{(2)} = -U_f^{(2)}/Z_1 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 双 IIDG 接入配电网故障特性

当配电网中接入 2 个 IIDG 时,配电网拓扑结构更加复杂,下面以 2 个 IIDG 处于同一支路且故障发生于 2 个 IIDG 之间的情况为例进行分析,以说明含多个 IIDG 配电网的短路电流分析方法。

当 IIDG₁ 接入 PCC₁、IIDG₂ 接入 PCC₂ 且 f 点发生 BC 相间故障时,其序网图见图 5,图中, $Z_1=Z_{AB}+Z_s$, $Z_2=Z_{Bf}$, $Z_3=Z_{fC}$ 。

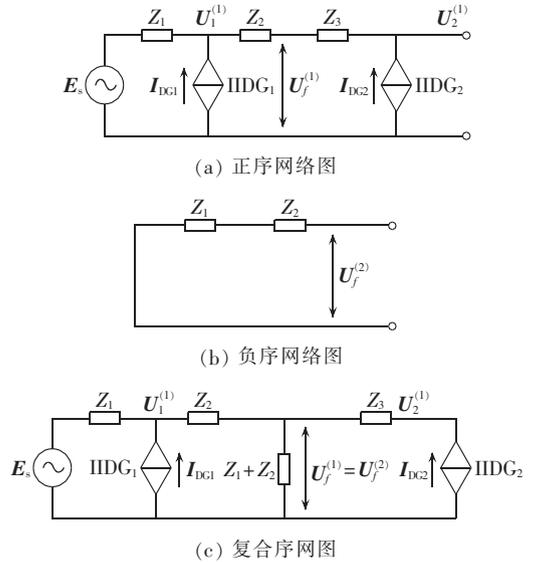


图 5 双 IIDG 配电网发生 BC 相间故障时的序网图

Fig.5 Sequence network of B-C inter-phase fault of distributed network with two IIDGs

根据复合序网图,由节点电压法可得到方程组:

$$\begin{cases} (1/Z_1 + 1/Z_2)U_1^{(1)} - U_f/Z_2 = E_s/Z_1 + I_{DC1} \\ \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_1+Z_2} + \frac{1}{Z_3}\right)U_f - \frac{U_1^{(1)}}{Z_2} - \frac{U_2^{(1)}}{Z_3} = 0 \\ U_2^{(1)}/Z_3 - U_f/Z_3 = I_{DC2} \end{cases} \quad (8)$$

其中, I_{DC1} 和 I_{DC2} 分别为 IIDG₁ 和 IIDG₂ 的输出电流。

以 IIDG₁ 运行于恒功率态、IIDG₂ 运行于中间态为例进行说明,则式(8)可变形为:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}\right)U_1^{(1)} - \frac{U_f}{Z_2} = \frac{E_s}{Z_1} + \frac{P_1}{3(U^{(1)})^2}U_1^{(1)} \\ \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_1+Z_2} + \frac{1}{Z_3}\right)U_f - \frac{U_1^{(1)}}{Z_2} - \frac{U_2^{(1)}}{Z_3} = 0 \\ \frac{1}{Z_3}U_2^{(1)} - \frac{U_f}{Z_3} = 2\left(0.9 - \frac{U_2^{(1)}}{U_{N2}}\right)I_{N2} \frac{U_2^{(1)}}{U_2^{(1)}} \angle \left(-\frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (9)$$

其中, I_{N2} 、 $U_2^{(1)}$ 、 U_{N2} 分别为 IIDG₂ 的额定电流、IIDG₂ 并网正序电压、IIDG₂ 并网电压额定值, $U_2^{(1)}$ 和 U_{N2} 的比值即为 IIDG₂ 并网电压标么值。

式(9)所示方程组可用牛顿迭代法^[15]进行迭代计算,解得 PCC 电压的幅值和相角。然后,可按照下式计算得到其余电气量的值。

$$U_f^{(1)} = U_f^{(2)} = \left[1 - 2Z_3 \left(0.9 - \frac{U_2}{U_{N2}} \right) \frac{I_{N2}}{U_2^{(1)}} \angle \left(-\frac{\pi}{2} \right) \right] U_2^{(1)} \quad (10)$$

$$\begin{cases} I_1^{(1)} = \frac{E_s - U_1^{(1)}}{Z_1} \\ I_1^{(2)} = I_2^{(2)} \end{cases} \quad (11)$$

本文主要研究配电网短路电流随 IIDG 容量和线路参数等因素变化的趋势,重点在于给出 IIDG 接入配电网的故障分析方法。所以,这里只给出了接入单个 IIDG 和 2 个 IIDG 的分析方法,而含 3 个及以上 IIDG 配电网的短路电流分析与含 2 个 IIDG 配电网的分析方法基本相同,本文不再赘述。

3 算例验证

为了验证上述推导过程的正确性,下面在 PSCAD 仿真平台中进行建模仿真。采用图 1 所示的含 IIDG 配电网拓扑结构,系统短路容量取 500 MV·A,即系统阻抗 $Z_s = j0.27 \Omega$,线路单位长度阻抗 $Z = 0.27 + j0.3454 \Omega$ 。将仿真结果与计算结果进行比较,结果如表 1—3 所示,其中 P_n 为 IIDG 额定输出功率; L_1 、 L_2 和 L_3 分别为上文推导得到的对应故障类型的短

表 1 单 IIDG 下游发生三相故障时短路电流理论值与仿真值的比较

Table 1 Comparison of short circuit current between theoretical and simulative values when three-phase fault occurs at down-stream of single IIDG

| 运行状态 | P_n / MW | L_1 / km | L_2 / km | I_1 /kA | | I_2 /kA | |
|------|---------------|---------------|---------------|-----------|--------|-----------|--------|
| | | | | 理论值 | 仿真值 | 理论值 | 仿真值 |
| 恒功率态 | 0.5 | 1.372 | 18 | 0.6749 | 0.6747 | 0.6933 | 0.6930 |
| 中间态 | 0.5 | 3.372 | 12 | 0.8594 | 0.8593 | 0.8658 | 0.8658 |
| 恒流态 | 0.5 | 5.372 | 1 | 1.9717 | 1.9711 | 1.9976 | 1.9961 |

表 2 单 IIDG 上游发生 BC 相间故障时短路电流理论值与仿真值的比较

Table 2 Comparison of short circuit current between theoretical and simulative values when B-C inter-phase fault occurs at up-stream of single IIDG

| 运行状态 | P_n / MW | L_1 / km | L_2 / km | I_{1b} /kA | | I_{1c} /kA | |
|------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------|--------------|--------|
| | | | | 理论值 | 仿真值 | 理论值 | 仿真值 |
| 恒功率态 | 2 | 6 | 6 | 1.9097 | 1.9089 | 2.0830 | 2.0822 |
| 中间态 | 2 | 4 | 5 | 3.0205 | 3.0193 | 2.9674 | 2.9663 |

表 3 双 IIDG 之间发生 BC 相间故障时短路电流理论值与仿真值的比较

Table 3 Comparison of short circuit current between theoretical and simulative values when B-C inter-phase fault occurs between two IIDGs

| 运行状态 | P_n /MW | L_1 /km | L_2 /km | L_3 /km | I_{1b} /kA | | I_{1c} /kA | | I_{2b} /kA | | I_{2c} /kA | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|
| | | | | | 理论值 | 仿真值 | 理论值 | 仿真值 | 理论值 | 仿真值 | 理论值 | 仿真值 |
| IIDG ₁ 恒功率态, IIDG ₂ 中间态 | 5 | 4 | 6 | 6 | 0.9540 | 0.9542 | 1.1541 | 1.1540 | 1.2553 | 1.2555 | 1.1459 | 1.1463 |

路电流计算公式中线路阻抗的等效长度; I_1 和 I_2 分别为流过 Z_1 和 Z_2 的故障电流; I_{1b} 、 I_{1c} 、 I_{2b} 和 I_{2c} 分别为流过 Z_1 的 B 相故障电流、流过 Z_1 的 C 相故障电流、流过 Z_2 的 B 相故障电流和流过 Z_2 的 C 相故障电流。

由表中数据可以看出,采用本文提出的含 IIDG 配电网短路电流计算方法计算得到的短路电流数值与仿真值基本一致,从而证明了本文方法的正确性。

针对具体的电路拓扑结构和故障类型,在各类仿真软件中搭建模型进行仿真能够比较精确地得到故障发生时短路电流的数值,可以为特定情况的短路特性分析提供依据。但是此方法存在很大的局限性,那就是不能直观地看出短路电流随系统参数、故障类型以及 IIDG 容量变化的趋势。而本文给出的短路电流计算方法建立了体现短路电流随系统参数及 IIDG 容量变化规律的具有通用性的数学表达式,弥补了上述方法的不足之处,从而为解决 IIDG 准入容量的计算及继电保护装置的整定等问题提供了有力的工具。

4 短路电流特性分析

在上文推导得到的短路电流计算公式的基础上,下面利用 MATLAB 软件绘制配电网各支路短路电流幅值随故障类型以及 IIDG 容量变化的趋势图,并总结 IIDG 接入配电网后对配电网短路电流的影响规律。

4.1 单 IIDG 下游线路发生三相短路故障

图 6 所示为 PCC 下游发生三相故障时其上游短路电流随 IIDG 容量的变化规律图,此时 IIDG 运行于恒功率态。

由图 6 可以看出,当 IIDG 运行于恒功率态时,PCC 上游短路电流随着 IIDG 容量的增加呈现先减小后增大的趋势,也即当 IIDG 的容量比较小时,其对上游短路电流的影响表现为外汲作用,而当 IIDG

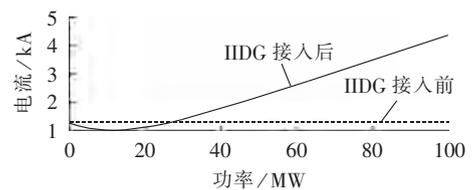


图 6 PCC 上游短路电流随 IIDG 容量变化情况

Fig.6 Variation of short circuit current at up-stream of PCC along with IIDG capacity

的容量比较大时,其对上游短路电流的影响表现为助增作用,并且 IIDG 的容量越大,其助增作用越明显。当 IIDG 运行于中间态或者恒流态时,PCC 上游短路电流大小随 IIDG 容量的变化规律与 IIDG 运行于恒功率态时的变化规律基本类似,也表现为先外汲后助增,只不过由于 IIDG 运行于中间态或者恒流态时其实际的输出功率比较小,所以需要较大的容量才能使其对上游短路电流的影响表现为助增作用,而且常见的 IIDG 通常达不到这个额定容量。下面以 IIDG 运行于恒功率态为例对这一现象的原因进行分析。

图 7 为系统电压和 IIDG 接入点电压相量关系图。图中, E_s 为系统电压相量; U_{00} 为 IIDG 输出功率为 0 时 IIDG 接入点的电压相量,该相量与 E_s 同相位,则 $\frac{E_s - U_{00}}{Z_1}$ 即为流过 IIDG 上游线路的短路电流相量; U_{11} 为 IIDG 输出功率不为 0 时的 IIDG 接入点电压相量,此时该电压相量与 E_s 存在相位差 φ ,则 $\frac{E_s - U_{11}}{Z_1}$ 即为 IIDG 输出功率不为 0 时流过 IIDG 上游线路的短路电流相量。则在图 7 所示情况下,由于 $E_s - U_{11}$ 和 $E_s - U_{00}$ 的模相等(均为以 E_s 末端为圆心的圆的半径),所以此时满足 IIDG 接入前和接入后其上游线路故障电流幅值相等。如果 IIDG 容量继续增大,则 φ 也随之增大,那么 $E_s - U_{11}$ 的模值将会大于 $E_s - U_{00}$ 的模值,表现为 IIDG 对其上游短路电流的助增作用。

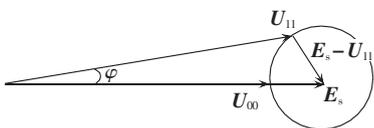


图 7 系统电压和 DG 接入点电压相量关系图

Fig.7 Relationship between system and PCC voltage vectors

由图 7 能够计算出当 IIDG 对 PCC 上游短路电流的影响处于外汲作用和助增作用的分界点时其容量的取值。根据余弦定理,此时 U_{11} 和 φ 需满足的关系为:

$$E_s \cos \varphi = \frac{U_{11}^2 + E_s^2 - (E_s - U_{00})^2}{2U_{11}} \quad (12)$$

联立上式及式(2)可得:

$$P = \frac{3E_s U_{11} \sin \varphi}{Z_1 \sin \alpha_1} \quad (13)$$

当 PCC 下游发生三相故障时,在 IIDG 运行于恒功率态的前提下,如果 IIDG 的容量等于上述 P 值,则 IIDG 上游线路短路电流的幅值既不增加也不减小;如果 IIDG 的容量小于上述 P 值,则 IIDG 上游线路短路电流的幅值会比不接 IIDG 时小;如果 IIDG 的容量大于上述 P 值,则 IIDG 上游线路短路电流幅值

会比不接 IIDG 时大,此时可能会导致 IIDG 上游继电保护装置误动作,失去选择性。

4.2 单 IIDG 上游线路发生两相短路故障

IIDG 分别运行于恒功率态和中间态时,故障点上游 B 相和 C 相短路电流随 IIDG 容量的变化规律分别如图 8 和图 9 所示。

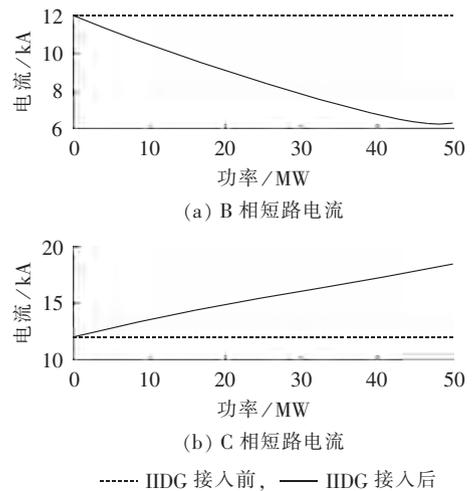


图 8 恒功率态下故障点上游短路电流随 IIDG 容量的变化情况

Fig.8 Variation of short circuit current at up-stream of fault location along with IIDG capacity in constant-power state

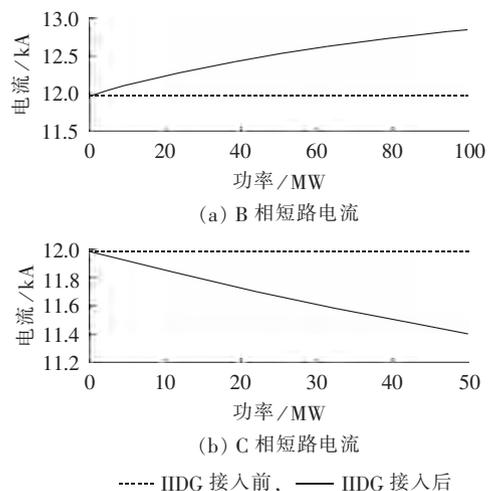


图 9 中间态下故障点上游短路电流随 IIDG 容量的变化情况

Fig.9 Variation of short circuit current at up-stream of fault location along with IIDG capacity in middle state

由图 8 和图 9 可以看出,当 IIDG 上游线路发生两相故障时,如果 IIDG 的运行状态不同,则其对故障点上游的故障相的电流的影响也不同。当 IIDG 运行于恒功率态时,IIDG 的接入对故障点上游的 B 相短路电流的影响表现为外汲作用,对故障点上游的 C 相短路电流的影响表现为助增作用;当 IIDG 运行于中间态时,则对故障点上游的 B 相短路电流的影响

表现为助增作用,对故障点上游的 C 相短路电流的影响表现为外汲作用。

4.3 双 IIDG 处于同一支路且故障发生于两者之间

如果 IIDG₁ 运行于恒功率态、IIDG₂ 运行于中间态,则各短路电流幅值随 2 个 IIDG 容量的变化规律如图 10 所示,图中, P_1 为 IIDG₁ 的容量; P_2 为 IIDG₂ 的容量。

由图 10(a)可以看出, IIDG₁ 上游 B 相短路电流(即 I_{1b})的变化趋势和 2 个 IIDG 容量的选取有关:当 IIDG₂ 容量较大而 IIDG₁ 容量较小时, I_{1b} 的幅值会超过 IIDG 接入之前的短路电流幅值;在其他情况下, I_{1b} 的幅值小于 IIDG 接入之前的短路电流幅值。

由图 10(b)可以看出, IIDG₁ 上游 C 相短路电流(即 I_{1c})的变化趋势也和 2 个 IIDG 容量的选取有关:当 IIDG₁ 容量较大而 IIDG₂ 容量较小时, I_{1c} 的幅值会超过 IIDG 接入之前的短路电流幅值;而当 IIDG₁ 的容量较小时, I_{1c} 的幅值会小于 IIDG 接入之前的短路电流幅值。

由图 10(c)可以看出, IIDG₁ 和故障点之间的 B 相短路电流幅值(即 I_{2b})只有当 2 个 IIDG 的容量都比较小的时候才会低于 IIDG 接入之前对应线路的短路电流幅值,而在其他情况下均会大于 IIDG 接入之前的短路电流幅值,且随着 2 个 IIDG 容量的增大, I_{2b} 的幅值也会变大。

由图 10(d)可以看出, IIDG₁ 和故障点之间的 C 相短路电流幅值(即 I_{2c})只有在 IIDG₁ 的容量比较大、IIDG₂ 的容量比较小的时候, I_{2c} 才会大于 IIDG 接入之前的对应线路的短路电流幅值。

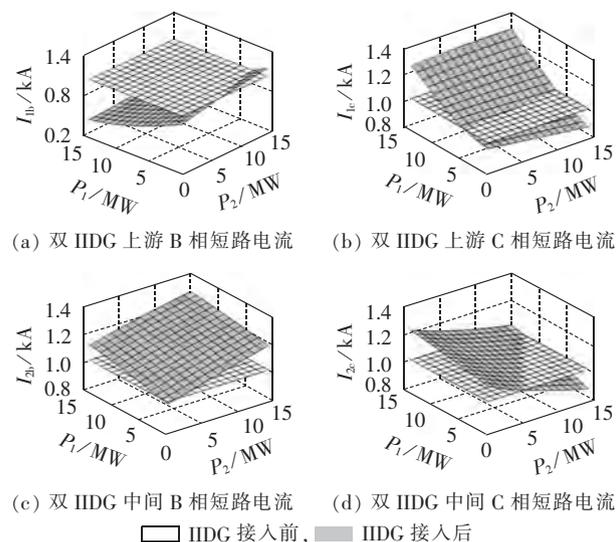


图 10 含双 IIDG 配电网短路电流随两 IIDG 容量的变化规律

Fig.10 Variation of short circuit current of distribution network with two IIDGs along with IIDG capacity

4.4 一般性规律

含单 IIDG 及双 IIDG 配电网的其余故障情况分析方法和上面介绍的方法类似,在此不再赘述,只给出一般性规律如下。

a. 线路发生故障时, IIDG 的接入对流过 IIDG 下游的短路电流均表现为助增作用,不受故障位置及类型的影响,且 IIDG 容量越大,其助增作用越明显,这样可能使 IIDG 下游的继电保护装置误动作,失去选择性。

b. IIDG 下游发生三相故障时, IIDG 上游短路电流随 IIDG 容量的增大先减小后增大,即 IIDG 容量较小时对上游短路电流的影响表现为外汲作用,这样可能会导致上游继电保护装置对区间内故障拒动。而 IIDG 容量较大时对上游短路电流的影响表现为助增电流,这样则可能导致上游继电保护装置的误动作。

c. IIDG 上游或下游发生 BC 相间故障时,如果 IIDG 输出有功功率(即运行于恒功率态),那么会使 IIDG 上游 B 相电流减小、C 相电流增大。如果 IIDG 输出无功功率(即运行于恒流态或中间态),则会使 IIDG 上游 B 相电流增大、C 相电流减小。

d. 含双 IIDG 的配网发生故障后,各支路短路电流的变化情况为 2 个 IIDG 分别单独作用时的短路电流变化效果之和,即如果每个 IIDG 单独接入时对该支路短路电流均表现为助增作用,则 2 个 IIDG 的合成作用效果也为助增;如果每个 IIDG 单独接入时对该支路短路电流均表现为外汲作用,则 2 个 IIDG 的合成作用效果也为外汲作用;如果这 2 个 IIDG 分别单独接入时对该支路短路电流表现为相反的作用,则 2 个 IIDG 的合成作用效果需根据具体的线路参数及 IIDG 容量情况由上文介绍的短路电流计算公式推导而得。

e. 特例:双 IIDG 之间发生 BC 相间故障时,下游 IIDG 对双 IIDG 上游的各相故障电流均表现为助增作用,而与 IIDG 的运行状态无关。

f. 由于系统对公共母线电压的支撑作用,相邻线路 IIDG 的接入对故障支路短路电流的影响非常小。

5 结语

含 IIDG 配电网短路电流计算的研究对 IIDG 技术的发展具有十分重要的意义,直接影响了含 IIDG 配电网的保护配置方法。本文在实地调研生产厂家的 IIDG 故障控制策略的基础上,提出了一套完整的含带 LVRT 特性的 IIDG 配电网短路电流精确计算方法,本文方法适用于不同的配电网拓扑结构和故障类型,并以 2 个 IIDG 为例给出了多个 IIDG 接入

时短路电流计算方法,具有广泛的适用性。在准确的短路电流计算方法的基础上,本文详细分析了影响含 IIDG 配电网短路电流大小的因素,并总结提取短路电流随系统参数及 IIDG 容量变化的一般性规律,以便为继电保护原理的整定或改进提供理论依据。

参考文献:

- [1] 孙鸣,赵月灵,王磊. DG 容量及接入方式对变电站继电保护定值的影响[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):46-49.
SUN Ming,ZHAO Yueling,WANG Lei. Impact of DG capacity and location on relay protection of substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):46-49.
- [2] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32.
CHEN Wei,AI Xin,WU Tao,et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):26-32.
- [3] 李斌,袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):10-17.
LI Bin,YUAN Yue. Impact of grid-connected photovoltaic power generation on protection and reclose,and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):10-17.
- [4] 孙景钉,李永丽,李盛伟,等. 含分布式电源配电网的快速电流保护方案[J]. 天津大学学报,2010,43(2):102-108.
SUN Jingdiao,LI Yongli,LI Shengwei,et al. A fast current protection scheme for distribution system with distributed generations [J]. Journal of Tianjin University,2010,43(2):102-108.
- [5] 韩奕,张东霞. 含逆变型分布式电源的微网故障特征分析[J]. 电网技术,2011,35(10):147-152.
HAN Yi,ZHANG Dongxia. Fault analysis of microgrid composed by inverter-based distributed generations[J]. Power System Technology,2011,35(10):147-152.
- [6] BARAN M,EL-MARKABY I. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators[C]//Power Engineering Society General Meeting,2006. Montreal,Que,Canada:IEEE,2006:1.
- [7] PLET C A,GRAOVAC M,GREEN T C,et al. Fault response of grid-connected inverter dominated networks[C]//Power and Energy Society General Meeting,2010 IEEE. Minneapolis,USA:IEEE,2010:1-8.
- [8] 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.
WANG Chengshan,SUN Xiaoqian. An improved short circuit calculation method for distribution network with distributed generations [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(23):54-58.
- [9] 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.
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]. Proceed-

ings of the CSEE,2013,33(34):65-74.

- [10] 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.
- [11] 国家电网公司. Q/GDW 617—2011 光伏电站接入电网技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [12] 陈波,朱晓东,朱凌志,等. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(17):6-12.
CHEN Bo,ZHU Xiaodong,ZHU Lingzhi,et al. Strategy for reactive control in low voltage ride through of photovoltaic [J]. Power System Protection and Control,2012,40(17):6-12.
- [13] 郑飞,张军军,丁明昌,等. 基于 RTDS 的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):19-24.
ZHENG Fei,ZHANG Junjun,DING Mingchang,et al. Low voltage ride-through modeling and control strategy for photovoltaic generation system based on RTDS [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(22):19-24.
- [14] 王京宝,曾国宏,荆龙,等. 光伏并网逆变器及其低电压穿越技术[J]. 低压电器,2012(17):26-30,63.
WANG Jingbao,ZENG Guohong,JING Long,et al. Grid-connected photovoltaic inverter and its low voltage ride-through technology [J]. Low Voltage Apparatus,2012(17):26-30,63.
- [15] 柳辉. 解非线性方程的牛顿迭代法及其应用[J]. 重庆工学院学报:自然科学版,2007,21(8):96-98.
LIU Hui. Newton iteration method for nonlinear equation solutions and its application [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology:Natural Science Edition,2007,21(8):96-98.

作者简介:



谭会征

谭会征(1989—),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为含分布式电源的配电网的保护与控制(E-mail:realthz@tju.edu.cn);

李永丽(1963—),女,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统故障分析、保护与控制等方面的研究工作(E-mail:lyltju@163.com);

陈晓龙(1985—),男,河南濮阳人,博士研究生,研究方向为微电网及含分布式电源配电网的保护与控制(E-mail:promising1207@163.com);

赵曼勇(1957—),女,安徽寿县人,教授级高级工程师,硕士,从事电网机电保护管理和研究工作;

刘年(1986—),男,湖北宜昌人,硕士,主要从事电力系统生产运行及研究工作(E-mail:tigerln@qq.com);

黄维芳(1986—),男,江西宜春人,工程师,硕士,主要从事电力系统继电保护生产运行及研究工作(E-mail:huangweifang@csg.cn)。

(下转第 52 页 continued on page 52)

mation of Electric Power Systems, 2011, 35(6):20-24.

- [20] 丁晓群, 黄伟, 章文俊, 等. 基于电压控制区的主导节点电压校正方法[J]. 电网技术, 2004, 28(14):44-47.
DING Xiaoqun, HUANG Wei, ZHANG Wenjun, et al. A pilot bus voltage correction method based on voltage control area[J]. Power System Technology, 2004, 28(14):44-47.
- [21] ORERO S O, IRVING M R. A genetic algorithm for network partitioning in power system state estimation[C]//UKACC International Conference on Control'96. [S.l.]: IET, 1996:162-165.

作者简介:



成 煜

成 煜(1990—), 男, 甘肃秦安人, 硕士研究生, 主要从事电力系统分析与计算相关研究(E-mail: chengyuzhifeng1109@126.com);
杭乃善(1949—), 男, 广西南宁人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电力系统优化计算、电力系统运行与控制及电能质量方面的研究。

Reactive voltage control partitioning based on power network pilot node identification

CHENG Yu, HANG Naishan

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Since it is difficult to quantitatively determine the pilot nodes after the traditional clustering-based reactive voltage partitioning, a method is proposed to quantitatively identify the pilot nodes of whole power network before the reactive voltage partitioning, which loosens all PV nodes up to PQ nodes, applies the power flow equations in the form of injecting current to work out the nodes with voltage violation, corrects in turn the voltage-violated node to normal according to its linear sensitivity to the voltages of rest nodes, and determines all pilot nodes by the further power flow calculation verification. The reactive power source control space is built by setting the partition number as the pilot node number and the linear sensitivity of node voltage to its injecting reactive current as the reactive voltage scale. The cloud clustering algorithm is applied to transform the nodes of whole power network from the reactive power source control space to the cloud model and the cloud generator is adopted to realize the clustering-based partitioning with the pilot node as the centre for all nodes of whole power network. The results of simulative test for IEEE 14-bus and IEEE 30-bus systems verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: pilot nodes; linear sensitivity; reactive power source control space; cloud model; voltage partition; voltage control; models; sensitivity analysis; clustering algorithm

(上接第 37 页 continued from page 37)

Influence of inverter-interfaced distributed generator with low-voltage ride-through capability on short circuit current of distribution network

TAN Huizheng¹, LI Yongli¹, CHEN Xiaolong¹, ZHAO Manyong^{2,3}, LIU Nian², HUANG Weifang^{2,3}

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Power Dispatching Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China; 3. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The existing methods of short circuit current calculation for distribution network is no longer applicable due to the large-scale integration of IIDG (Inverter-Interfaced Distributed Generator), which makes the relay protection setting of IIDG-contained distribution network much difficult. The low-voltage ride-through characteristics of IIDG and its control strategy are analyzed, based on which, a universal method of short circuit current calculation is proposed for the distribution network with one or two IIDGs. It makes the IIDG equivalent to a voltage-controlled current-source model contained only in the positive-sequence network, establishes the short circuit current calculation equations by analyzing the equivalent circuit or compound-sequence network of the IIDG-contained distribution network for different types of faults, and deduces the short circuit current calculating formulas. Its correctness is proved by the results of PSCAD simulation. According to the deduced calculating formulas, the general variation rules of short circuit current along with the variation of system parameters and IIDG capacity are analyzed by MATLAB for the IIDG-contained distribution network.

Key words: inverter-interfaced distributed generator; distribution networks; low-voltage ride-through; positive control; short circuit current calculation; fault characteristic analysis