

计及配电网电流保护整定原则的逆变型 分布式电源准入容量计算

陈晓龙¹,李永丽¹,赵曼勇²,文安²,魏承志²,黄维芳²

(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)

摘要: 为评估逆变型分布式电源(IBDG)接入对配电网原有保护的影响并配置适合的保护方案,提出了一种计及配电网原有三段式电流保护整定原则的IBDG准入容量计算方法。不断假设、校验和修正IBDG的运行状态,选择使得校验结果和假设吻合的短路电流计算公式,并最终计算得到满足保护选择性和灵敏性要求的IBDG准入容量。对含IBDG的10 kV配电网进行IBDG准入容量计算和仿真验证,结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 逆变型分布式电源; 准入容量; 配电网; 电流保护; 整定; 分布式电源

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.023

0 引言

分布式电源 DG(Distributed Generation)接入配电网,改变了配电网原有电流保护配置的基础条件,对配电网短路电流的影响表现为助增电流、外汲电流和反向电流,从而导致原有的三段式电流保护可能误动、灵敏性降低甚至拒动^[1-4]。计及配电网电流保护整定计算原则的 DG 准入容量,指的是在不改变配电网原有电流保护配置的情况下,能够满足保护选择性和灵敏性要求的、允许 DG 接入的最大容量。该研究能够评估一定容量的 DG 接入配电网后对原有电流保护的选择性和灵敏性带来的影响,也为含 DG 配电网的保护方案配置提供了依据。

目前,已有一些关于电流保护约束下 DG 准入容量计算的研究成果。文献[1]根据流过保护的短路电流随 DG 容量变化的曲线,在不改变保护原有定值的前提下得到保证保护选择性的 DG 准入容量;文献[5]提出了一种考虑配电网保护动作和 DG 短路电流衰减特性影响的 DG 准入容量分析方法,并通过改进原有保护来提高 DG 准入容量;文献[6]分析了 DG 容量变化和并网点位置变化对电流保护的影响;文献[7]提出了考虑配电网相间保护约束的 DG 准入容量优化计算模型;文献[8]基于配电网故障区段定位算法分析了对 DG 容量的约束。上述文献主要是以同步机型 DG 为例进行分析的,并在分析过程中将其等效为含有内阻抗的恒定电势源。

然而,与同步机型 DG 相比,逆变型 DG IBDG(Inverter-Based Distributed Generation)的运行方式更加复杂,并且故障特性迥异,IBDG 不能采用和同步机型 DG 相同的等效模型。由于不同 IBDG 运行状态下的短路电流计算公式各不相同,因此选择正确的公式对保护进行重新整定和灵敏性校验就变得更加困难。在现有文献中,仅有文献[9]提及了在不改变保护原有定值的情况下电流保护选择性对 IBDG 容量的约束,用来分析在不改变原有定值的前提下 IBDG 接入对保护的影响。然而,该文献并未给出在 IBDG 的容量和运行状态均未知的前提下计算 IBDG 准入容量的具体方法。另外,在 DG 接入配电网后,通常需要对保护进行重新整定。

以具有低电压穿越能力的光伏发电系统为例,本文提出一种基于配电网原有电流保护整定原则的 IBDG 准入容量计算方法。该方法通过不断假设、校验和修正 IBDG 的运行状态,从而选择适当的 IBDG 运行状态下的短路电流计算公式对保护进行重新整定和灵敏性校验,得到满足保护选择性和灵敏性要求的、更加准确的 IBDG 准入容量。

1 含 IBDG 配电网的短路电流计算

1.1 IBDG 的短路计算模型

随着 IBDG 并网容量的不断增大,为了防止 IBDG 脱网对电网的正常运行可能带来的不良影响,IBDG 通常需要具备低电压穿越能力^[10-11]。根据国家标准 GB/T19964—2012《光伏电站接入电力系统技术规定》,在低电压穿越期间,光伏发电系统注入电力系统的动态无功电流 I_{sq} 应实时跟踪并网点电压变化,并应满足^[12]:

收稿日期:2015-06-08;修回日期:2016-01-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009-CB219704);中国南方电网公司重点科技项目

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB219704) and the Key Science & Technology Project of CSPG

$$\begin{cases} I_{sq}=0 & U_s > 0.9 \\ I_{sq}=K_1(0.9-U_s)I_N & 0.2 \leq U_s \leq 0.9 \\ I_{sq}=K_2I_N & U_s < 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, I_{sq} 为输出电流的无功分量; U_s 为并网点电压的标幺值; I_N 为光伏发电系统的额定电流; 在工程实际产品中, K_1 通常取为 2, K_2 通常取为 1.2, 则将其代入式(1)可知, 当并网点电压小于 0.3 p.u. 时, 其输出电流达到限流值 $1.2I_N$ 。另外, 当并网点电压小于等于 0.9 p.u. 时, 光伏发电单元的输出电压将被控制在开路电压附近, 以防止逆变器直流侧电压过高, 此时其输出的有功电流可以忽略不计。

由上文可知, 在含 IBDG 配电网的短路电流计算中, 可以用压控电流源模型对 IBDG 进行等效替代。另外, 根据并网点电压跌落程度, IBDG 存在 3 种运行状态, 现将其分别定义为恒功率态(并网点电压大于 0.9 p.u.)、中间态(并网点电压大于等于 0.3 p.u., 且小于等于 0.9 p.u.)和恒流态(并网点电压小于 0.3 p.u.)。

1.2 含 IBDG 配电网的短路电流计算

本文以图 1 所示系统中 IBDG 下游的线路 BC 发生三相短路故障为例, 给出含 IBDG 配电网的短路电流计算方法以及短路电流近似计算原则。

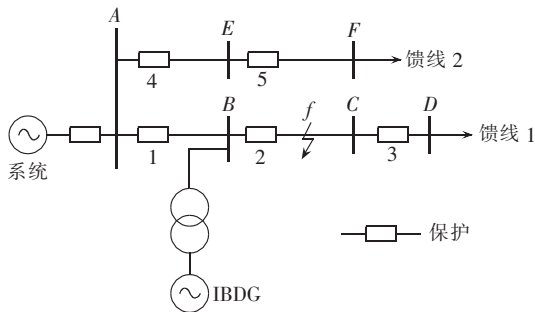


图 1 接有 IBDG 的简单配电网

Fig.1 Simple distribution network with IBDG

当图 1 所示系统中 f 点发生三相短路故障时, 其等效电路如图 2 所示, 则由节点电压法可得:

$$\left(\frac{1}{Z_{AB}+Z_s} + \frac{1}{Z_f} \right) U = \frac{E_s}{Z_{AB}+Z_s} + I_{DG} \quad (2)$$

其中, Z_s 、 Z_{AB} 和 Z_f 分别为系统等值阻抗、线路 AB 的阻抗和故障点到并网点之间的线路阻抗; E_s 和 U 分别为系统相电势和并网点相电压; I_{DG} 为 IBDG 的输出电流。

当 IBDG 运行于恒功率态、中间态和恒流态时,

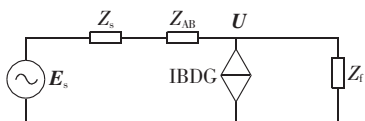


图 2 IBDG 下游 f 点发生三相短路故障时的等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of three-phase short circuit fault at f , downstream point of IBDG

其输出电流的大小和相位各不相同, 分别如式(3)、(4)和(5)所示。

$$I_{DG} = \frac{P}{3U^2} U \quad (3)$$

$$I_{DG} = 2 \left(0.9 - \frac{\sqrt{3}U}{U_N} \right) \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N} \frac{U \angle -90^\circ}{U} \quad (4)$$

$$I_{DG} = 1.2 \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N} \frac{U \angle -90^\circ}{U} \quad (5)$$

其中, P 为 IBDG 的出力; P_N 和 U_N 分别为 IBDG 的额定功率和额定电压; U 为 U 的模值。根据上述各式, 可以计算得到不同的 IBDG 运行状态下流过 IBDG 上游和下游线路的短路电流。

含 IBDG 配电网的短路电流相量表达式计算准确但十分复杂^[13]。考虑到并网点电压受到大系统的钳制以及 IBDG 准入容量通常较小, 可以忽略并网点电压和系统电势之间的相角差。另外, 为了便于分析计算, 近似认为系统阻抗和线路阻抗的阻抗角相等。根据上述近似和简化, 能够得到流过 IBDG 下游线路和上游线路的短路电流近似计算公式。与实际值相比, 流过 IBDG 下游线路和上游线路的短路电流近似计算值分别偏大和偏小。因此, 当根据短路电流近似计算公式对保护进行重新整定或灵敏性校验时, 能够保证保护的选择性和灵敏性。

2 配电网电流保护对 IBDG 容量的约束

IBDG 接入配电网对短路电流的影响表现为助增电流、外汲电流和反向电流, 下面基于电流保护整定原则分析不同位置保护对 IBDG 容量的约束。

当相邻馈线或者 IBDG 下游线路发生故障时, IBDG 的接入对流过相邻馈线和 IBDG 下游线路的短路电流的影响表现为助增电流, 可能使得电流保护 I 段和 II 段误动作。为了保证选择性, 需要根据 IBDG 接入后的短路电流公式, 对相邻馈线和 IBDG 下游线路保护的电流 I 段和 II 段进行重新整定。然后, 根据 IBDG 退出运行并且发生两相相间短路时的短路电流, 对保护的灵敏性进行校验, 从而得到能够满足保护选择性和灵敏性要求的 IBDG 容量。

当 IBDG 下游线路发生故障时, IBDG 的接入对流过 IBDG 上游线路的短路电流的影响表现为外汲电流。故障点距离 IBDG 越远, 流过 IBDG 上游线路的短路电流越小。因此, 以 IBDG 下游线路末端发生两相相间短路故障时, IBDG 上游线路电流保护 III 段作为 IBDG 下游线路远后备保护的灵敏性对 IBDG 容量进行约束。

当相邻馈线发生故障时, IBDG 的接入对流过 IBDG 上游线路的短路电流的影响表现为反向电流,

此电流可能使得 IBDG 上游线路的保护误动作。当故障点距离馈线首端较近时,IBDG 并网点电压将很低,IBDG 将运行于恒流态。因此,利用 IBDG 能够提供的最大反向短路电流 $1.2I_N$ 小于 IBDG 上游线路电流保护的定值来对 IBDG 容量进行约束。

3 IBDG 准入容量计算方法及含 IBDG 配电网的保护配置方案

将前述不同位置保护选择性和灵敏性约束下的 IBDG 容量进行比较,取其最小值作为计及配电网电流保护整定计算原则的 IBDG 准入容量。

3.1 关于 IBDG 准入容量计算的分析

由第 2 节中分析可知,当 IBDG 接入对短路电流的影响表现为反向电流时,利用 IBDG 上游线路保护的选择性对 IBDG 容量进行约束;当 IBDG 接入对短路电流的影响表现为助增电流和外汲电流时,利用保护的灵敏性对 IBDG 容量进行约束。其中,保护选择性约束下的 IBDG 容量与 IBDG 运行状态无关,保护灵敏性约束下的 IBDG 容量则需要已知并网点电压大小的前提下,选择适当的 IBDG 运行状态下的短路电流计算公式来计算得到。然而,并网点电压的计算与 IBDG 容量、IBDG 接入点位置和故障点位置有关。针对某一具体含 IBDG 配电网,当计算保护灵敏性约束下的 IBDG 容量时,并网点电压和 IBDG 容量均为未知量。因此,IBDG 准入容量的计算过程是一个估算过程。

当 IBDG 运行于恒流态时,其输出电流最大,对保护的影响也最严重。若按照 IBDG 运行于恒流态时的短路电流公式计算 IBDG 容量,虽然能够保证保护的选择性和灵敏性,但得到的 IBDG 容量最保守,增大了对电网和保护进行不必要改造的概率。

为了选择出适当的 IBDG 运行状态下的短路电流计算公式来对不同位置的保护进行重新整定和校验,本文方法不断假设、校验和修正 IBDG 的运行状态,并以校验结果和假设前提相吻合作为计算过程结束的标准。因此,该方法计算得到的 IBDG 容量,既能够保证保护的选择性和灵敏性,也更加准确。

3.2 所提方法的基本原理

在正常运行情况下,IBDG 的运行状态为恒功率态。当含 IBDG 的配电网由正常运行状态变为故障状态时,只有在并网点电压不再满足 IBDG 恒功率态的运行条件的情况下,IBDG 才会运行于中间态或恒流态。因此,在计算 IBDG 容量的过程中,无论首先假设 IBDG 运行于任何一种运行状态,对该运行状态均需按照 IBDG 运行于恒功率态时的并网点电压公式进行校验。根据不同的首次假设的运行状态和校验结果,后续处理步骤包括以下情况。

a. 首次假设 IBDG 运行于中间态。由于恒流态是中间态的一种特殊情况,因此若并网点电压不满足中间态的运行条件,则将 IBDG 的运行状态修改为恒功率态来计算 IBDG 容量,后续处理步骤如 c 所示;否则,需要继续按照 IBDG 运行于中间态时的并网点电压公式,校验并网点电压是否满足恒流态的运行条件。若并网点电压仍然满足中间态的运行条件,则校验结果和假设前提吻合,计算过程结束;若并网点电压满足恒流态的运行条件,则将 IBDG 的运行状态修改为恒流态来计算 IBDG 容量,后续处理步骤如 b 所示。

b. 首次假设 IBDG 运行于恒流态。若并网点电压满足恒功率态的运行条件,则将 IBDG 的运行状态修改为恒功率态,后续处理步骤如 c 所示;否则,继续按照中间态时的并网点电压公式进行校验。若并网点电压满足恒流态的运行条件,则计算过程结束;否则,将 IBDG 运行状态修改为中间态,后续处理步骤如 a 所示。

c. 首次假设 IBDG 运行于恒功率态。若校验结果和假设前提吻合,则计算过程结束;否则,将 IBDG 的运行状态修改为中间态或恒流态,后续处理步骤分别如 a、b 所示。

由上述分析可知,在计算 IBDG 容量的过程中,可能出现校验结果和假设前提无法吻合的情况。在这种情况下,为保证计算容量能够使得保护满足选择性和灵敏性要求,可利用 3 种运行状态间的边界条件计算得到更加准确的、允许 IBDG 接入的最大容量。具体步骤及说明见 3.3 节。

3.3 所提方法的具体实施步骤

根据上述基本原理,本文所提方法的具体实施步骤如下。

步骤 1 首先按照 IBDG 运行于中间态时的短路电流公式计算保护灵敏性约束下的 IBDG 容量 P_1 。

步骤 2 将 P_1 代入 IBDG 运行于恒功率态时的并网点电压公式中,判断 IBDG 下游线路和相邻馈线上线路末端发生三相短路时并网点电压是否存在大于 0.9 p.u. 的情况。若不存在,则不满足 IBDG 恒功率运行的条件,转入步骤 3;否则,对相关保护按照 IBDG 运行于恒功率态时的短路电流公式进行重新整定和灵敏性校验,并计算得到修正后的 IBDG 容量 P_2 。将 P_2 再次代入相关线路末端发生三相短路且 IBDG 运行于恒功率态时的并网点电压公式中进行校验。若并网点电压大于 0.9 p.u.,则校验结果和假设前提吻合,计算过程结束, P_2 为保护灵敏性约束下的 IBDG 容量;否则,增大 IBDG 容量至 P_3 ,使得并网点电压恰好等于 0.9 p.u.,则 P_3 为保护灵敏性约束下的 IBDG 容量。

关于 P_3 的取值可用反证法来说明其合理性:假设 IBDG 容量大于 P_3 ,则 IBDG 将运行于恒功率状态,此时保护灵敏性约束下的 IBDG 容量为 P_2 ,其值小于 P_3 ,因此假设不成立, P_3 为该情况下满足保护灵敏性要求的最大容量。

步骤 3 将 P_1 代入 IBDG 运行于中间状态时的并网点电压计算公式中,判断 IBDG 下游线路和相邻馈线上线路末端发生三相短路时并网点电压是否存在小于 0.3 p.u. 的情况。若不存在,则校验结果和假设前提吻合, P_1 为保护灵敏性约束下的 IBDG 容量。否则,对相关保护按照 IBDG 运行于恒流态时的短路电流公式进行重新整定和灵敏性校验,得到 IBDG 容量 P_4 。将 P_4 再次代入到相关线路末端发生三相短路且 IBDG 运行于中间态时的并网点电压公式中进行校验。若并网点电压小于 0.3 p.u.,则校验结果和假设前提吻合, P_4 为保护灵敏性约束下的 IBDG 容量;否则,减小 IBDG 的容量至 P_5 ,使得并网点电压恰好等于 0.3 p.u.,此时 P_5 为保护灵敏性约束下的 IBDG 容量。

关于 P_5 的取值也可用反证法来说明其合理性:假设 IBDG 容量小于 P_5 ,则 IBDG 将运行于恒流态,此时保护灵敏性约束下的 IBDG 容量为 P_4 ,其值大于 P_5 ,因此假设不成立, P_5 为该情况下满足保护灵敏性要求的最大容量。

上述步骤 1 中,无论首先按照何种 IBDG 运行状态来计算 IBDG 容量,最终得到的保护灵敏性约束下的 IBDG 容量是相同的。将保护灵敏性约束下的 IBDG 容量和保护选择性约束下的 IBDG 容量进行比较,取其较小值即为计及配电网电流保护整定原则的 IBDG 准入容量。

3.4 含 IBDG 配电网的保护配置方案

将保护灵敏性约束下的 IBDG 容量记为 $P_{Zr.lm}$,保护选择性约束下的 IBDG 容量记为 $P_{Zr.sz}$,待接入配电网的 IBDG 实际容量记为 P_N ,则 P_N 、 $P_{Zr.lm}$ 和 $P_{Zr.sz}$ 的比较结果及相应保护配置方案包括以下 3 种情况。

情况 1:IBDG 的准入容量为 $P_{Zr.sz}$,且 IBDG 的实际容量 $P_N < P_{Zr.sz}$ 。在这种情况下,当相邻馈线发生故障时,IBDG 提供的反向短路电流不会使得 IBDG 上游线路保护误动作,仅需按照电流保护整定原则对 IBDG 下游线路和相邻馈线的保护重新整定即可,保护的选择性和灵敏性均能满足要求。

情况 2:IBDG 的准入容量为 $P_{Zr.sz}$,且 IBDG 的实际容量 $P_N \geq P_{Zr.sz}$ 。此时,需根据下面 2 种情景进行具体分析。

a. 若 $P_N < P_{Zr.lm}$,则该情况和情况 1 的区别仅在于 IBDG 上游线路保护需配置方向元件。

b. 若 $P_N \geq P_{Zr.lm}$,则某个或某些保护装置已不能

再配置三段式电流保护,而需采用新的保护配置方案,比如配置基于本地信息的自适应电流保护^[14-16]和基于多点信息的广域保护^[17-20]等,以适应该容量的 IBDG 接入配电网。需要说明的是,仅需对灵敏性无法满足要求的某个或某些保护改造即可,以降低成本。

情况 3:IBDG 的准入容量为 $P_{Zr.lm}$ 。若 $P_N < P_{Zr.lm}$,则该情况与情况 1 相同;否则,该情况和情况 2 中的情景 b 相同。

综上,对于不同的 IBDG 实际接入容量,含 IBDG 配电网的保护配置方案如图 3 所示。

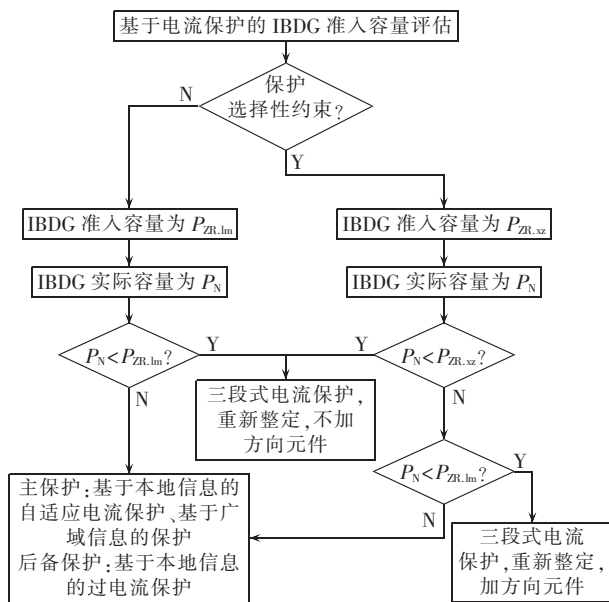


图 3 不同情况下含 IBDG 配电网的保护配置方案

Fig.3 Protection configuration scheme for different conditions of distribution network with IBDG

4 算例分析与仿真

4.1 算例模型

本算例的系统结构图如图 1 所示。各母线处均接有额定功率为 1.5 MV·A、额定功率因数为 0.85 的负荷,各馈线最大负荷均设为 12 MV·A。系统的基准容量取为 100 MV·A,基准电压取为 10.5 kV,其短路容量取为 400 MV·A。线路参数为 $\alpha_1 = 0.347 \Omega/\text{km}$ 、 $r_1 = 0.27 \Omega/\text{km}$ 。在本算例中,设置了如下 2 种情况,其区别在于线路长度不同。

情况①:线路 AB、BC、CD、AE 和 EF 的长度分别为 3 km、5 km、9 km、3 km、5 km;

情况②:线路 AB、BC、CD、AE 和 EF 的长度分别为 1 km、2 km、5 km、2 km、3 km。

另外,电流保护 I 段、II 段和 III 段的可靠系数分别取为 1.2、1.1 和 1.15,自启动系数取为 1.1,返回系数取为 0.95。电流保护 I 段的最小保护范围取为 15% 的线路全长,电流保护 II 段和电流保护 III 段远后备保护的灵敏系数分别不小于 1.3 和 1.2。

4.2 IBDG 准入容量计算及仿真验证

根据前文分析,IBDG 上游保护选择性约束下的 IBDG 容量与 IBDG 运行状态无关。经过计算,在情况①中,保护 1 电流 I 段、Ⅱ段和Ⅲ段选择性约束下的 IBDG 容量分别为 69.3 MW、32.1 MW 和 13.3 MW;在情况②中,保护 1 电流 I 段、Ⅱ段和Ⅲ段选择性约束下的 IBDG 容量分别为 154.4 MW、76.2 MW 和 13.3 MW。

对于保护灵敏性约束下的 IBDG 容量,首先按照 IBDG 运行于中间态时的短路电流公式进行计算。其中,保护 3 和保护 5 是馈线末端保护,对 IBDG 容量没有约束。保护 1、保护 2 和保护 4 灵敏性约束下的 IBDG 容量如表 1 所示。

表 1 保护灵敏性约束下的 IBDG 容量计算结果
Table 1 Results of IBDG penetration level calculation with protection sensitivity constraint

情况	短路 电流 影响	保护 1 约束下 的容量/MW	保护 2 约束下的 容量/MW		保护 4 约束下的 容量/MW	
		Ⅲ段	I 段	Ⅱ段	I 段	Ⅱ段
①	助增	—	244.6	16.8	∞	∞
	外汲	221.7	—	—	—	—
②	助增	—	232.3	∞	∞	∞
	外汲	∞	—	—	—	—

注:“—”表示该段电流保护对 IBDG 容量没有约束。

由表 1 可知,在情况①中,保护 2 电流Ⅱ段灵敏性约束下的 IBDG 容量最小,为 16.8 MW;在情况②中,保护 2 电流 I 段灵敏性约束下的 IBDG 容量最小,为 232.3 MW。将上述容量代入到 IBDG 运行于恒功率态时的并网点电压公式中进行校验,计算得到不同保护所在线路末端发生三相短路时并网点电压标幺值如表 2 所示。

表 2 并网点电压校验结果
Table 2 Results of PCC voltage verification

情况	容量/MW	并网点电压标幺值			
		线路 BC	线路 CD	线路 AE	线路 EF
①	16.8	0.70	0.92	0.98	1.07
②	232.3	1.04	1.36	1.37	1.48

由表 2 可知,2 种情况下 IBDG 运行于中间态的假设前提和校验结果均不吻合,需采用 IBDG 运行于恒功率态时的短路电流公式进行修正。修正后,保护灵敏性约束下的 IBDG 容量如表 3 所示。

由表 3 可知,修正后,在保护灵敏性约束下,情况①、② IBDG 容量最小值分别为 2.9 MW 和 48.9 MW。此时,根据 IBDG 运行于恒功率态时的并网点电压公式,并网点电压校验结果如表 4 所示。

由表 4 可知,在情况①中,保护 2 电流Ⅱ段灵敏性约束下的 IBDG 容量最小,但是其值不能使得当保护 3 所在线路 CD 末端发生三相短路时 IBDG 运行于恒功率态,故保护灵敏性约束下的 IBDG 容量可以

表 3 修正后保护灵敏性约束下的 IBDG 容量计算结果
Table 3 Results of IBDG penetration level calculation with protection sensitivity constraint,after correction

情况	短路 电流 影响	保护 1 约束下 的容量/MW	保护 2 约束下的 容量/MW		保护 4 约束下的 容量/MW	
		Ⅲ段	I 段	Ⅱ段	I 段	Ⅱ段
①	助增	—	39.2	2.9	8 192	269
	外汲	62.6	—	—	—	—
②	助增	—	67.2	48.9	2 180	57.1
	外汲	234.8	—	—	—	—

注:“—”表示该段电流保护对 IBDG 容量没有约束。

表 4 修正后的并网点电压校验结果
Table 4 Results of PCC voltage verification,after correction

情况	容量/MW	并网点电压标幺值			
		线路 BC	线路 CD	线路 AE	线路 EF
①	2.9	0.61	0.82	0.86	0.95
①	13.5	0.68	0.90	0.95	1.04
②	48.9	0.71	0.97	0.95	1.06

继续增大至 13.5 MW;在情况②中,当 IBDG 容量为 48.9 MW 且保护 3 所在线路末端发生三相短路时,并网点电压大于 0.9 p.u.,假设前提和校验结果吻合,故保护灵敏性约束下的 IBDG 容量为 48.9 MW。

综上,若 IBDG 上游线路保护 1 没有配置方向元件,则 2 种情况下 IBDG 的准入容量均为 13.3 MW;否则,在这 2 种情况中,均是保护 2 电流Ⅱ段的灵敏性约束下的 IBDG 容量最小,IBDG 准入容量分别为 13.5 MW 和 48.9 MW。为了便于对比分析,本文也根据 3.1 节中提到的保守方法对 IBDG 准入容量进行了计算。当按照最严重情况即 IBDG 运行于恒流态的短路电流公式计算 IBDG 的准入容量时,2 种情况下计算得到的结果分别为 2.28 MW 和 32.7 MW。

为了验证上述 IBDG 准入容量计算方法的有效性,在 PSCAD 仿真软件中对上述算例进行了建模,并通过不断提高 IBDG 容量、核对 IBDG 运行状态和流过相关保护短路电流的方法,得到 IBDG 准入容量的仿真值。经过仿真,若 IBDG 上游保护 1 没有配置方向元件,则 2 种情况下 IBDG 的准入容量均为 13.8 MW;否则,保护 2 的电流Ⅱ段灵敏性约束下的 IBDG 容量最小,2 种情况下 IBDG 准入容量分别为 17 MW 和 65 MW。通过对比上述计算和仿真数据可知,本文提出的 IBDG 准入容量计算方法,能够得到满足保护选择性和灵敏性要求的、更加准确的 IBDG 准入容量。

5 结论

a. 提出了一种计及配电网电流保护整定原则的 IBDG 准入容量计算方法。该方法通过不断假设、校验和修正 IBDG 的运行状态,使得校验结果和假设前提吻合,从而选择适当的 IBDG 运行状态下的短路电流计算公式对保护进行重新整定和灵敏性校验,

能够计算得到满足保护选择性和灵敏性要求的、更加准确的IBDG准入容量。

b. 当IBDG的实际接入容量大于IBDG准入容量时,需根据容量对比结果对保护配置方案进行改进,如加装方向元件、对灵敏性无法满足要求的某个或某些保护装置配置基于本地信息的自适应电流保护和基于广域信息的保护等,以适应不同容量的IBDG接入配电网。

参考文献:

- [1] 冯希科,邵能灵,宋凯,等. DG容量对配电网电流保护的影响及对策研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(22):156-160.
FENG Xike,TAI Nengling,SONG Kai,et al. Research on the impact of DG capacity on the distribution network current protection and countermeasure[J]. Power System Protection and Control,2010,38(22):156-160.
- [2] 林霞,陆于平,吴新佳,等. 分布式发电系统对继电保护灵敏度影响规律[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):54-59.
LIN Xia,LU Yuping,WU Xinjia,et al. Influence law of distributed generation on relay protection sensitivity[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):54-59.
- [3] 周卫,张尧,夏成军,等. 分布式发电对配电网线路保护的影响[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(3):1-5.
ZHOU Wei,ZHANG Yao,XIA Chengjun,et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control,2010,38(3):1-5.
- [4] 尚璠,邵能灵,刘琦,等. 考虑分布式电源的配电网保护改进方案研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(24):40-45.
SHANG Jin,TAI Nengling,LIU Qi,et al. New protection method for distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control,2012,40(24):40-45.
- [5] 王江海,邵能灵,宋凯,等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):37-43.
WANG Jianghai,TAI Nengling,SONG Kai,et al. Penetration level permission for DG in distributed network considering relay protection[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(22):37-43.
- [6] 陶顺,郭静,肖湘宁. 基于电流保护原理的DG准入容量与并网位置分析[J]. 电网技术,2012,36(1):265-270.
TAO Shun,GUO Jing,XIAO Xiangning. Anaysis on allowed penetration level of distributed generation and its grid-connected position based on principles of current protection[J]. Power System Technology,2012,36(1):265-270.
- [7] 雷金勇,黄伟,夏翔,等. 考虑相间短路影响的分布式电源准入容量计算[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):82-86.
LEI Jinyong,HUANG Wei,XIA Xiang,et al. Penetration level calculation with considerations of phase-to-phase short circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(3):82-86.
- [8] 郑涛,贾仕龙,潘玉美,等. 基于配电网原故障定位方案的分布式电源准入容量研究[J]. 电网技术,2014,38(8):2257-2262.
ZHENG Tao,JIA Shilong,PAN Yumei,et al. Research on allowed penetration level of DGs based on the traditional fault location methods[J]. Power System Technology,2014,38(8):2257-2262.
- [9] 李亚辉,康积涛,叶兰兰. 考虑配电网保护约束的IIDG准入容量及对策分析[J]. 中国电力,2013,46(3):47-52.
- [10] LI Yahui,KANG Jitao,YE Lanlan. Calculation of penetration level for inverter interfaced distributed generator considering protection in distribution network constraints and related countermeasures[J]. Electric Power,2013,46(3):47-52.
- [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.
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.
- [12] 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.
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.
- [13] 中国电力科学研究院,中国科学院电工研究所,国网电力科学研究院. 光伏发电站接入电力系统技术规定:GB/T19964—2012[S]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [14] 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.
TAN Huizheng,LI Yongli,CHEN Xiaolong,et al. Influence of inverter-interfaced distributed generator with low-voltage ride-through capability on short circuit current of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(8):31-37.
- [15] 孙景钊,李永丽,李盛伟,等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护[J]. 电力系统自动化,2009,33(14):71-76.
SUN Jingliao,LI Yongli,LI Shengwei,et al. Study on adaptive current instantaneous trip protection scheme for distribution scheme for distribution network with inverter interfaced DG[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(14):71-76.
- [16] 马静,王希,米超,等. 含分布式电源的配电网自适应保护新方法[J]. 电网技术,2011,35(10):204-208.
MA Jing,WANG Xi,MI Chao,et al. A new adaptive protection approach for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology,2011,35(10):204-208.
- [17] 陈晓龙,李永丽,谭会征,等. 含逆变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.
- [18] 孙景钊,陈荣柱,蔡斌,等. 含分布式电源配电网的故障定位新方案[J]. 电网技术,2013,37(6):1645-1650.
SUN Jingliao,CHEN Rongzhu,CAI Shi,et al. A new fault location scheme for distribution system with distributed generations[J]. Power System Technology,2013,37(6):1645-1650.
- [19] 贾浩帅,郑涛,赵萍,等. 基于故障区域搜索的配电网故障定位算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):1-5.
JIA Haoshuai,ZHENG Tao,ZHAO Ping,et al. Fault location algorithm for the distribution system based on fault region searching[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(14):1-5.

护策略[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 82-89.

LIN Xia, LU Yuping, WANG Lianhe, et al. An intelligent current protection strategy for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 82-89.

[20] 高孟友, 徐丙垠, 张新慧. 基于故障电流幅值比较的有源配电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 21-25.

GAO Mengyou, XU Bingyin, ZHANG Xinhui. Fault location based on fault current amplitude comparison for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 21-25.

作者简介:



陈晓龙

陈晓龙(1985—), 男, 河南濮阳人, 讲师, 博士, 主要研究方向为含分布式电源配电网以及微电网的保护与控制(E-mail: promising1207@163.com.);

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: lytju@163.com.)。

IBDG penetration level calculation considering current protection setting principle for distribution network

CHEN Xiaolong¹, LI Yongli¹, ZHAO Manyong², WEN An², WEI Chengzhi², HUANG Weifang²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Dispatching Center of China Southern Power Grid, Guangdong 510623, China)

Abstract: In order to evaluate the impact of IBDG(Inverter-Based Distributed Generation) integration on the existing protections of distribution network and configure a proper protection scheme, a method of IBDG penetration level calculation considering the setting principle of 3-zone current protection for the distribution network is proposed. The operating status of IBDG is unceasingly assumed, verified and corrected until the verification result conforms to the assumption, the formula of short circuit current calculation is thus selected and the IBDG penetration level obtained, which meets the requirements of protection for both selectivity and sensitivity. The IBDG penetration level of a 10 kV distribution network is calculated and verified by simulation and the simulative results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: inverter-based distributed generation; penetration level; distribution network; current protection; setting; distributed power generation