

DOI: 10.7652/xjtuxb201510018

分布式电源对配电网电流保护影响的 语义规则库分析方法

马晓博¹, 柯德平¹, 孙元章¹, 程波²

(1. 武汉大学电气工程学院, 430072, 武汉; 2. 湖北省电力公司发展策划部, 430077, 武汉)

摘要: 为解决分布式电源(DG)接入传统配电网导致三段式电流保护无法正常工作的问题,提出了一种能判断一般的配网系统中 DG 接入对电流保护影响的语义规则库分析方法。首先,使用语义规则来设置 DG 对电流保护影响的校核,每条规则依次刻画了不同短路场景下对应电流保护的Ⅰ段、Ⅱ段和Ⅲ段正确动作的判定条件;若所有规则按顺序校验通过,则判断 DG 接入方案不会对三段式电流保护产生影响;反之,保护则可能拒动或误动。然后,提出一种应用该规则库的 DG 准入容量优化方法,通过规则库生成 DG 准入容量的约束条件,在保证三段式电流保护可靠动作的前提下,优化多个 DG 的接入容量使其容量之和最大。仿真结果表明:当 DG 接入容量在 $8.19 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 以内时,三段式电流保护均可以正确动作,所提方法不仅能准确求解配电网中 DG 的准入容量,而且操作简单、易于工程实现。

关键词: 分布式电源;配电网;三段式电流保护;准入容量;语义规则库

中图分类号: TM71 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)10-0109-07

Analysis of Semantic Rules for the Influences of Integrating Distributed Generations on the Distribution Network Current Protections

MA Xiaobo¹, KE Deping¹, SUN Yuanzhang¹, CHENG Bo²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: An applicable analysis of semantic rules that consider the influences of integrating distributed generations (DGs) on the distribution network current protections is proposed to effectively solve the malfunction of existing three-phase current protections. The semantic rules are used to describe the decision condition of three-phase current protections correct operation under different short circuit scenes. It is judged that the integrating DGs have no influence on the current protections in a generic distribution network if the semantic rules pass the validation process in order, otherwise it will lead to either malfunction or movement resistance. Then, the base of rules is applied to generate constraints for calculating the permitted capacities of DGs for integration. Specifically, the capacities of the integrated DGs are optimized so that the total capacity of them is maximized while the existing over-current protections can normally operate. Simulation results show that the DG capacity within $8.19 \text{ MV} \cdot \text{A}$ can ensure the current protection correct operation, and the high accuracy and efficiency of the presented rules are verified.

收稿日期: 2015-04-16。 作者简介: 马晓博(1990—),女,硕士生;柯德平(通信作者),男,博士,讲师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB215101)。

网络出版时间: 2015-09-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150911.1047.002.html>

Keywords: distributed generation; distribution network; three-phase current protection; permitted capacity; semantic rules

分布式电源(DG)大规模接入中低压配电网改变了传统配电网的单电源辐射式供电模式,将直接威胁电网的安全稳定运行。目前,已有大量文献研究 DG 接入对配电网的线路潮流^[1]、静态电压^[2-3]、谐波^[4]、网损^[5]和短路电流分布^[6-7]的影响,其中,评估 DG 接入对配电网中传统三段式电流保护的影响引起了众多学者的广泛关注。从理论上讲,对于给定的配网拓扑结构和参数、相应的阶段式电流保护配置和整定值,正确判断 DG 接入后对保护的影响可以按照一般性遍历法,例如,文献[7]中穷举所有可能出现的短路电流(分别对应不同短路位置、类型或程度),并检验各个短路电流下系统所有保护的 I、II 和 III 段的选择性和灵敏性。很显然,遵循此一般性遍历法的判断过程将计算量巨大,不具有实际可操作性。文献[8-9]在文献[7]的基础上,只对有限短路场景(包括短路位置、类型和程度)下系统部分保护的相应段进行校验,在保证判断结果准确性的前提下大大节省了计算时间。但是,此类研究均只针对各自所研究的配网系统以及 DG 接入情况(包括接入数量、类型、位置和容量),其得到的校验过程明显不具有一般性,即无法移植于其他配网系统和/或 DG 接入情况。从工程应用的角度看,更希望基于一种一般性的语义规则库来指导校验过程。

针对上述问题,本文通过理论推导、泛化得到一般的配网系统中分析 DG 接入对传统三段式电流保护影响的实用化语义规则库。当规则库中的所有规则逐条校验通过时,可以判断 DG 接入方案将不会影响保护的正确动作;反之,保护则可能拒动或误动。该规则库在保证判断结果的准确性的前提下,排除了所有非必要的校验步骤,因而具有较高的校验效率。将该规则库应用于目前广受关注的 DG 准入容量优化的研究问题中,即通过规则库便捷地生成准入容量计算的约束条件,进一步使用差分进化(DE)算法搜索多个 DG 的最优接入容量,在保证三段式电流保护正确动作的前提下使其接入容量之和最大。

1 DG 的短路计算模型

在短路计算中,通常认为当电源容量大于 3 倍短路容量时,可以看做无限大容量的电源,其短路的暂态过程可以忽略^[10]。接入低压配电网的 DG 容

量一般有限,故障电流衰减较慢^[7],鉴于此,本文研究 DG 提供的短路电流时考虑其暂态过程,通过分析不同类型 DG 的短路暂态运行特性,归类出统一的短路计算模型。

接入配电网的 DG 按照其接口可以分为基于同步发电机的 DG、基于异步发电机的 DG 以及基于逆变器的 DG 3 大类。基于同步发电机的 DG 一般根据戴维南定理等效为一个电源串联电抗的模型。以风力发电机为代表的异步发电机在短路故障时,按照磁链守恒原则,其定子和转子绕组中都会产生相应的电流分量以保证定子和转子绕组中的交变磁链不发生突变,因此,异步发电机可以用一个与转子绕组的磁链成正比的电动势,即次暂态电动势以及相应的次暂态电抗作为短路暂态过程的电源和电抗^[10]。以光伏发电为代表的逆变型 DG 可以通过改变拓扑结构和调整控制策略将故障电流限制为额定电流的 1.5 倍以内^[11],其对配电网三段式电流保护的影响一般很小,在本文研究中不作考虑。

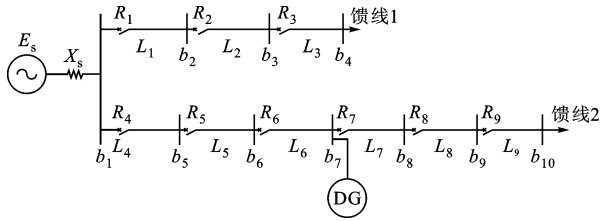
综上分析可知,不同类型 DG 在短路故障分析中均可近似等效为电势源串联电抗的模型。

2 DG 接入对配电网电流保护的影响分析

本文的研究对象是具有辐射式网架结构的配电网,通过详细分析 DG 上游、下游以及相邻线路上发生短路故障时 DG 接入对配电网三段式电流保护的影响,泛化得到分析一般系统中 DG 接入对保护影响的语义性步骤,即语义规则库。语义规则库中包含若干条顺序执行的语义规则,这些一般性的语义规则适用于任意的配网系统和 DG 接入情况,且每条规则通过描述性语言指导操作者该如何构造短路场景,并选择哪些保护的 I、II 或者 III 段进行校验。这样,操作者无须根据所研究的系统来分析确定校验步骤,只要顺序执行规则库中的语义规则便能高效准确地判断 DG 接入方案对保护的影响,同时可以避免由于操作者分析水平受限而导致的不准确校验结论。

2.1 故障发生在 DG 下游

图 1 是某典型 10 kV 配电网示意图,由 2 条馈线组成,首先从单 DG 接入母线 b_i 开始,进而推广到多 DG 的一般化情况。



$b_1 \sim b_{10}$ 分别表示各段母线; $L_1 \sim L_9$ 表示各条子线路;
 $R_1 \sim R_9$ 分别表示与各条子线路相对应的电流保护装置;
 E_s, X_s 分别为系统电源的内电势和电抗
 图 1 DG 接入的配电网系统示意图

当 L_8 上发生短路故障,本应由 R_8 动作切除故障,但 DG 接入后和系统电源一起向短路点提供故障电流,可能导致 R_7 的 I 段保护范围延伸到下一段线路,从而失去选择性(本文只讨论保护范围延伸到下一段相邻线路的情况)。同时, L_8 上距离 DG 最近的母线 b_8 上发生三相短路时流过 R_7 的电流 I_7 最大,因此,为保证 DG 不会引起 R_7 误动作,要求此最大短路电流小于 R_7 的 I 段整定值 $I_{R_7}^I$,即 $I_7 < I_{R_7}^I$ 。

DG 对下游故障点短路电流的助增作用导致下游各保护的保护区都相应增大,假设 R_7 和 R_8 所在线路的末端母线上分别发生三相短路故障,则流过 R_7 和 R_8 的短路电流以及其 I 段整定值分别为

$$I_7 = \frac{E_{sd}}{Z_{sd} + Z_7} \quad (1)$$

$$I_{R_7}^I = \frac{KE_s}{X_s + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7} \quad (2)$$

$$I_8 = \frac{E_{sd}}{Z_{sd} + Z_7 + Z_8} \quad (3)$$

$$I_{R_8}^I = \frac{KE_s}{X_s + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8} \quad (4)$$

式中: E_{sd} 和 Z_{sd} 分别为 DG 和系统电源组成的双电源供电系统的等效电源和等效阻抗; E_s 和 X_s 分别为系统电源的内电势和电抗; $Z_4 \sim Z_8$ 为线路 $L_4 \sim L_8$ 的阻抗; K 为瞬时电流速断保护的可靠系数,一般取 1.2~1.3。当 R_7 所在线路的末端母线上发生三相短路故障时, R_7 的 I 段恰好动作,即 $I_7 = I_{R_7}^I$,可得

$$Z_{sd} = \frac{E_{sd}(X_s + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7)}{KE_s} - Z_7 \quad (5)$$

将 Z_{sd} 代入式(3),可得

$$I_8 = KE_s / [X_s + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + K \frac{E_s}{E_{sd}} Z_8] \quad (6)$$

假设此时 DG 提供的短路故障电流恰好使 R_8 的 I 段保护范围超过本线路的全长,即 $I_8 > I_{R_8}^I$,又因为

$$E_{sd} = \frac{ZE_d'' + X_d'' E_s}{Z + X_d''} \quad (7)$$

式中 E_d'' 和 X_d'' 分别为分布式电源的次暂态电动势和次暂态电抗, Z 为系统电源到 DG 安装处之间的阻抗,所以

$$E_d'' > K + \frac{(K-1)X_d''}{Z} \quad (8)$$

一般情况下,发电机的次暂态电势取 1.05~1.15^[12],即式(8)的约束条件不满足,这意味着在 R_7 的 I 段保护不误动的前提下, R_8 的 I 段也不会误动作。因此,可以得到如下结论:若 DG 的下游有 2 条及以上线路,只需保证距离 DG 最近的保护 I 段的保护范围不延伸到下一段线路,下游其他保护的 I 段均可以正确动作。

此外,根据整定原则, R_7 的 II 段保护动作值一定大于 R_8 的 I 段动作值 ($I_{R_7}^{II} > I_{R_8}^I$),虽然 DG 的接入导致 R_7 的 II 段保护范围增大,但是在 R_8 下游一定不存在触发 R_7 的 II 段而不触发 R_8 的 I 段的故障区域(如图 2 所示)。所以,由于 R_7 的 II 段保护范围超过 R_8 的 I 段保护范围而出现误动的情况也不存在,同样的推论适用于 DG 下游其他保护的 II 段。综上所述, DG 接入 b_7 后,保证 DG 下游各保护正确动作的约束条件为 $I_7 < I_{R_7}^I$ 。

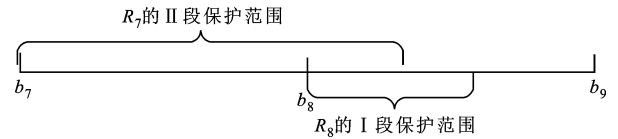


图 2 电流保护装置 R_7 与 R_8 的配合示意图

多个 DG 同时接入配电网对保护 I 段的影响如图 3 所示,其分析过程与单个 DG 相似:只要保证距离最下游 DG 最近的保护 I 段的保护范围不超过其所在线路的全长(如图 3 系统中 R_4 不误动,其 I 段整定值大于 b_5 上发生三相短路时流过 R_4 的短路电流),则该 DG 下游所有的保护均能正确动作;只要保证距离下游倒数第 2 个 DG 最近的保护 I 段的保护范围不超过其所在线路全长(如图 3 中 R_3 不误动),则当该 DG 下游发生短路故障时,故障点到 DG 之间的所有保护均能正确动作;上述过程持续进行直到最首端 DG。

2.2 故障发生在 DG 上游

在图 1 所示的系统中, DG 的上游线路发生短路故障时, DG 上游的保护可能会因流过反向故障电流而误动作,例如 L_5 上发生短路,有可能导致 R_6 误动作。在 DG 上游所有保护的整定值中 $I_{R_6}^{II}$ 最小,同时, DG 上游距离其最近的母线 b_6 短路时流过 R_6

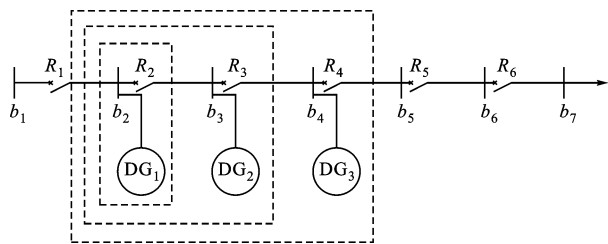


图3 多DG组成的电源系统对其下游保护的影响

的短路电流 I_6 最大。因此,只要保证 $I_6 < I_{R_6}^{\text{II}}$,则 R_6 正确动作(不误动作),且 DG 上游的其他保护均不会误动作。值得注意的是,此时 DG 将无法隔离故障点,可能导致自动重合闸失败。因此,DG 须装备防孤岛装置,在此情况下主动从电网解裂,保障配电网安全自动装置的正常运行。

当多个 DG 接入时,分析过程与上节类似:首先保证距离最上游 DG 最近的保护 II 段不误动,在该 DG 上游任意位置发生短路时,其上游所有保护均能正确动作;然后,保证距离上游第 2 个 DG 最近的保护 II 段不误动,上游任意故障点到该 DG 之间的所有保护均能正确动作(不误动作)。上述过程持续进行直到最末端的 DG,其示意图如图 4 所示。

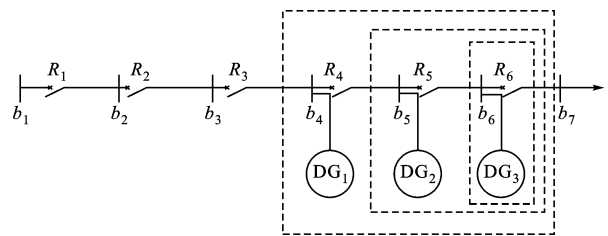


图4 多DG组成的电源系统对其上游保护的影响

上述分析中只考虑了保护的 I 和 II 段,关于过电流保护(III段)的讨论如下:①对于 DG 下游的保护,DG 接入使流过 III 段保护的短路电流增大,灵敏度提高;②对于 DG 上游的保护,当上游发生故障时,保护可能因流过 DG 提供的反向短路电流而误动作,但因 DG 都配备了防孤岛装置,将在一定时限后切除处于孤岛运行的 DG,由于该时限通常远小于过电流保护的时延,故能避免造成保护 III 段误动作;③对于 DG 上游的保护,当下游发生故障时,保护可能因流过的短路电流减小而出现拒动现象(当 III 段保护作为相邻线路的远后备保护时,要求至少保护到下一段相邻线路的全长)。DG 接入对配电网过电流保护的影响如图 5 所示。取临界情况分析,在图 5 中,当 R_2 的 III 段保护范围恰好缩小至下一段相邻线路末端,即母线 b_4 短路时,流过 R_2 的短路电流恰好等于其 III 段保护的启动值,计算得到的

DG₁ 容量为其临界容量,即 DG 的实际接入容量小于此临界容量时可以保证 R_2 的 III 段作为远后备保护不拒动。需要说明的是:由于 III 段的动作电流一般较小,所以按照上述方法计算得到的临界容量通常都远远大于 DG 的实际接入容量。

对于多个 DG 接入的情况,最上游 DG(如 DG₁)的临界容量的确定不受下游 DG 的影响,此规律可依次类推。但是,此容量却会影响下一个相邻 DG 的临界容量,其容量越大,下一个 DG 的临界容量也愈大。因此,取极端情况,即上游所有 DG 容量均为临界容量时,计算相邻下一个 DG 的临界容量,如 DG₁ 为临界容量时,计算 DG₂ 的临界容量。综上所述,为保证 III 段保护不误动,要使 DG 实际接入容量小于计算得到的临界容量。

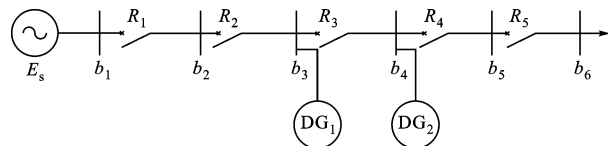


图5 DG接入对配电网过电流保护的影响

2.3 故障发生在 DG 相邻馈线

图 1 中,DG 的相邻线路发生短路故障时,相邻线路上的保护可能因 DG 提供的反向故障电流而误动作。例如 L_2 上发生短路故障可能导致 R_1 的 I 段保护误动,而实际情况分析如下:DG 和系统电源组成的等效电源 E_{sd} 和等效电抗 Z_{sd} 分别为

$$E_{sd} = \frac{(X_d'' + Z_4 + Z_5 + Z_6)E_s + X_s E_d''}{X_d'' + Z_4 + Z_5 + Z_6 + X_s} \quad (9)$$

$$Z_{sd} = \frac{(X_d'' + Z_4 + Z_5 + Z_6)X_s}{X_d'' + Z_4 + Z_5 + Z_6 + X_s} \quad (10)$$

由于 $X_s \leq X_d'' + Z_4 + Z_5 + Z_6$,可得 $E_{sd} \approx E_s$, $Z_{sd} \approx X_s$,表明流过相邻线路上保护的短路电流基本不受 DG 的影响。对于多个 DG 接入的情况,上述结论依然成立,因为 DG 内电势相对于相邻线路上短路点的转移阻抗要远远大于系统电源内电势到短路点的转移阻抗,因此前者所提供的短路电流相对于后者而言可以忽略不计。

2.4 语义规则库的推导

总结上述 DG 接入辐射式配电网对保护 I、II 和 III 段的影响,泛化得到系统性校验步骤并整理成如下语义规则。

(1)由上文分析可知,DG 由于其容量限制一般不会对其相邻馈线上的保护产生影响,因此,以配电网系统的每条馈线为研究对象进行分析,若一条馈线上接有 n 个 DG,由系统电源端向馈线下游依次

排布,分别记为 $DG_1, DG_2, \dots, DG_n$ 。

(2) $F_1 \rightarrow F_n$ 分别为从馈线下游向系统电源端方向标记的保护, $B_1 \rightarrow B_n$ 分别为从系统电源端向馈线下游方向标记的保护,因此, $F_1 \rightarrow F_n$ 与 $B_1 \rightarrow B_n$ 可能对应相同的保护,但是分别校验其 I 段和 II 段。 $I_1^F \sim I_n^F, I_1^B \sim I_n^B$ 分别为保护 $F_1 \rightarrow F_n, B_1 \rightarrow B_n$ 在其对应的短路场景下的短路电流, $I_1^I \sim I_n^I$ 为对应 $F_1 \rightarrow F_n$ 的 I 段保护整定值, $I_1^{II} \sim I_n^{II}$ 为对应 $B_1 \rightarrow B_n$ 的 II 段保护整定值,若 $I_1^F < I_1^I, I_2^F < I_2^I, \dots, I_n^F < I_n^I, I_1^B < I_1^{II}, I_2^B < I_2^{II}, \dots, I_n^B < I_n^{II}$ 均满足,表示 DG 接入不会对电流保护的 I 和 II 段产生影响。DG 接入后保护正确动作的判定条件如表 1 所示。

(3)若上述判定条件不能全部满足,则表明 DG 接入会对电流保护产生影响,此 DG 接入方案将导致保护误(或拒)动作。

(4)在表 1 的 III 段校验中,给定“短路场景”和“对应保护”是为了计算 $DG_1, DG_2, \dots, DG_n$ 的临界容量,记为 $S_{1\max}, S_{2\max}, \dots, S_{n\max}$,若 DG 的实际接入容量均小于其临界容量,即判定条件 $S_{1\max} > S_{DG_1}, S_{2\max} > S_{DG_2}, \dots, S_{n\max} > S_{DG_n}$ 均满足,则 DG 接入不会对保护的 III 段产生影响。

(5)实际经验^[7]表明,关于 I 段的判定条件最容易不满足,而关于 III 段的判定条件则较易满足。因此,从节省计算时间的角度看,一旦有判定条件不满足即无须进行后续校验,应安排先校验 I 段,其次是 II 段,最后是 III 段。

3 语义规则库的应用

根据上节中推导得到的语义规则库可以分析一

般的配网结构和参数以及 DG 接入情况下保护是否能正确动作。本文将进一步扩展其应用,优化多个 DG 接入配电网的准入容量,相应的数学模型如下

$$\begin{aligned} &\max (S_{DG_1} + S_{DG_2} + \dots + S_{DG_n}) \\ &\text{s. t. } g_i(S_{DG}) < b_i, i = 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned} \tag{11}$$

式中: $S_{DG_1}, S_{DG_2}, \dots, S_{DG_n}$ 分别为 $DG_1, DG_2, \dots, DG_n$ 的准入容量; $g_i(S_{DG}) < b_i$ 为配电网三段式电流保护正确动作(包括不拒动作和不误动作)的约束条件(以语义规则库的形式表达)。

相较于现有文献对 DG 准入容量的计算方法,约束优化问题式(11)则更具有一般性,即针对一般性配电网络以及 DG 接入情况计算其准入容量。由于语义规则库的易解读性,当求解具体的算例时,可以快速地形成具体的目标函数和优化条件。例如,在图 1 系统 b_3, b_6, b_7 处同时接入 DG,目标函数取 $\max(S_{DG_1} + S_{DG_2} + S_{DG_3})$,且根据前述语义规则库可以快速准确地形成保证保护正确动作的约束条件,具体优化模型如下

$$\begin{aligned} &\max(S_{DG_1} + S_{DG_2} + S_{DG_3}) \\ &\text{s. t. } \begin{cases} I_2 < I_{R_2}^{II} (L_1 \text{ 末端短路}) \\ I_5 < I_{R_5}^{II} (L_4 \text{ 末端短路}) \\ I_6 < I_{R_6}^{II} (L_5 \text{ 末端短路}) \\ I_6 < I_{R_6}^I (L_6 \text{ 末端短路}) \\ I_7 < I_{R_7}^I (L_7 \text{ 末端短路}) \\ S_{1\max} > S_{DG_1} (L_3 \text{ 末端短路}) \\ S_{2\max} > S_{DG_2} (L_6 \text{ 末端短路}) \\ S_{3\max} > S_{DG_3} (L_7 \text{ 末端短路}) \end{cases} \end{aligned} \tag{12}$$

本文采用差分进化算法(DE)对配电网中 DG 准

表 1 保护在对应短路场景下正确动作的判定条件

规则编号	短路场景	对应保护	判定条件
I 段保护	1 DG_n 下游距离其最近的母线上短路	DG_n 下游距离其最近的保护(记为 F_1)	$I_1^F < I_1^I$
	2 DG_{n-1} 下游距离其最近的母线上短路	DG_{n-1} 下游距离其最近的保护(记为 F_2)	$I_2^F < I_2^I$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	n DG_1 下游距离其最近的母线上短路	DG_1 下游距离其最近的保护(记为 F_n)	$I_n^F < I_n^I$
II 段保护	$n+1$ DG_1 上游距离其最近的母线上短路	DG_1 上游距离其最近的保护(记为 B_1)	$I_1^B < I_1^{II}$
	$n+2$ DG_2 上游距离其最近的母线上短路	DG_2 上游距离其最近的保护(记为 B_2)	$I_2^B < I_2^{II}$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$2n$ DG_n 上游距离其最近的母线上短路	DG_n 上游距离其最近的保护(记为 B_n)	$I_n^B < I_n^{II}$
III 段保护	$2n+1$ DG_1 下游距离其最近的母线上短路	DG_1 上游距离其最近的保护(对应为 B_1)	$S_{1\max} > S_{DG_1}$
	$2n+2$ DG_2 下游距离其最近的母线上短路	DG_2 上游距离其最近的保护(对应为 B_2)	$S_{2\max} > S_{DG_2}$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$3n$ DG_n 下游距离其最近的母线上短路	DG_n 上游距离其最近的保护(对应为 B_n)	$S_{n\max} > S_{DG_n}$

入容量进行优化配置, G_{en} 表示进化代数, N_p 为种群规模, S^b 表示种群中的最优个体, f 为关于准入容量的目标函数, g 为约束条件。DG 准入容量的差分进化算法流程如图 6 所示。

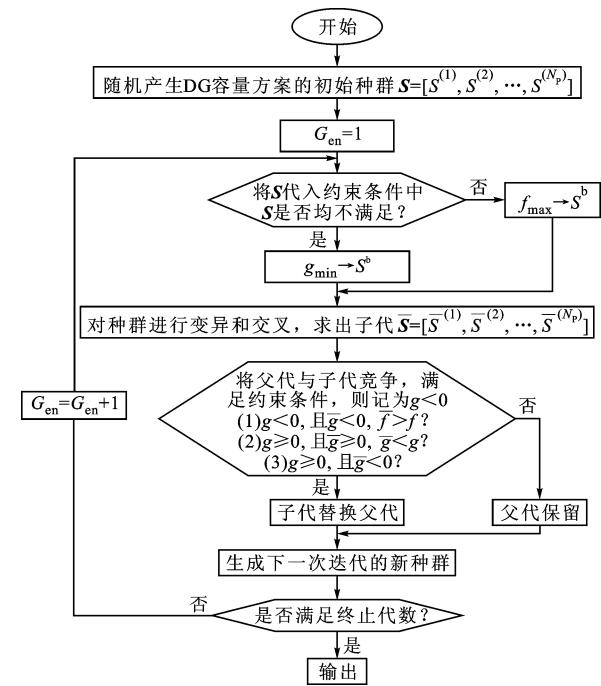


图 6 DG 准入容量的差分进化算法流程图

4 算例分析

用于仿真计算的配电网系统如图 1 所示,架空线路(LGJ-120/25)的参数为 $R=0.27\ \Omega/\text{km}$, $X=0.347\ \Omega/\text{km}$;电缆线路(YJLV22-150)的参数为 $R=0.259\ \Omega/\text{km}$, $X=0.093\ \Omega/\text{km}$ 。 $L_1\sim L_9$ 的长度分别为 4、6、6、2、2、7、7、14、14 km,每条母线处各接有额定容量为 2 MV·A、额定功率因数为 0.85 的负荷。在 $L_1\sim L_2$ 、 $L_4\sim L_8$ 配置三段式电流保护装置, L_3 和 L_9 位于馈线末端,配置两段式电流保护(I 段和Ⅲ段),本文选取 DG 的次暂态电抗的标么值(电抗的有名值与基准值的比值)为 0.1,以 DG

容量为基准容量。
运用 DE 算法求解多个 DG 接入配电网的准入容量优化模型(12),其参数设定为:种群规模 $N_p=50$,交叉因子 $C_R=0.9$,变异因子 $F=0.9$,进化代数 $G_{en}=500$,计算一次所需时间 $t=18.86\ \text{s}$,由于 DE 算法的优化结果具有不确定性,为了得到更加准确的 DG 准入容量,将 DE 算法连续运行 50 次,选取使目标函数值最大的优化结果作为 DG 的准入容量。图 7 给出了 DE 算法得到最优解的搜索过程,

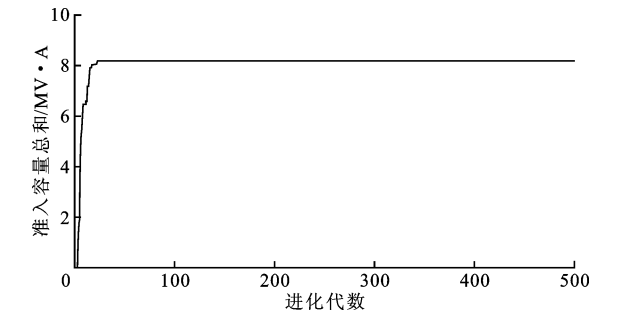


图 7 多个 DG 准入容量的搜索过程

从图 7 可以看出,当 DE 算法终止搜索时 DG 接入容量总和最大值为 8.19 MV·A,对应于 3 个 DG 的接入容量分别为 $S_1=4.55\ \text{MV}\cdot\text{A}$, $S_2=2.89\ \text{MV}\cdot\text{A}$, $S_3=0.75\ \text{MV}\cdot\text{A}$,因此,在满足继电保护可靠动作的前提下,配电网允许接入的 DG 最大容量如表 2 所示。

表 2 多个 DG 接入配电网的准入容量

DG 接入位置	母线 b_3	母线 b_6	母线 b_7
准入容量/MV·A	4.55	2.89	0.75

将 3 个 DG 分别以 4.55、2.89 和 0.75 MV·A 接入配电网母线 b_3 、 b_6 、 b_7 处,计算不同短路场景下流过对应保护的短路电流,计算结果见表 3。表 3 结果表明,通过优化模型得到的 DG 准入容量可以保证配电网原有三段式电流保护可靠动作,从而验证了所提语义规则库分析方法的有效性。

表 3 多个 DG 接入不同短路场景下流过对应保护的短路电流

故障点	I_1/kA	I_2/kA	I_3/kA	I_4/kA	I_5/kA	I_6/kA	I_7/kA	I_8/kA	约束条件
L_1 末端	3.31	1.81	0.04	0.07	0.07	0.02	0.01	0.00	R_2, II
L_3 末端	0.95	0.97	2.08	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	R_2, III
L_4 末端	0.11	0.11	0.00	6.37	1.64	0.39	0.11	0.00	R_5, II
L_5 末端	0.06	0.06	0.01	3.30	3.33	0.49	0.13	0.06	R_6, II
L_6 末端	0.03	0.03	0.00	1.42	1.43	2.04	0.15	0.10	$R_6, \text{I} / R_5, \text{III}$
L_7 末端	0.01	0.00	0.00	0.83	0.84	1.19	1.37	0.10	$R_7, \text{I} / R_6, \text{III}$

5 结 论

本文通过理论推导并考虑工程实际,提出一种实用化语义规则库用于指导分析 DG 接入后对配电网传统三段式电流保护的影响。该规则库通过描述性语言来设置对保护装置影响的校核规则,因此具有一般性,能针对任何辐射式配网系统及 DG 接入情况,快速准确地判断其对三段式电流保护的影响。以此语义规则库为基础,进一步建立了 DG 准入容量优化模型,能方便地求解一般性配网系统及 DG 接入情况下的准入容量。算例仿真验证了所提语义规则库分析方法的正确性。

参考文献:

- [1] 胡骅, 吴汕, 夏翔, 等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 13-17.
HU Ye, WU Can, XIA Xiang, et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 13-17.
- [2] SU C L. Stochastic evaluation of voltages in distribution networks with distributed generation using detailed distribution operation models [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 786-795.
- [3] SENJYU T, MIYAZATO Y, YONA A, et al. Optimal distribution voltage control and coordination with distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1236-1242.
- [4] 江南, 龚建荣, 甘德强. 考虑谐波影响的分布式电源准入功率计算 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 19-23.
JIANG Nan, GONG Jianrong, GAN Deqiang. Computing the maximum penetrating level of distributed generators in distribution network by taking into account of harmonic constraints [J]. Automation of Electric Power System, 2007, 31(3): 19-23.
- [5] 范雪峰, 夏懿, 贾春蓉, 等. 融合网损约束的分布式电源容量优化布置分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 121-126.
FAN Xuefeng, XIA Yi, JIA Chunrong, et al. Analysis of optimal placement of distributed generation ca-

capacity with limited power grid lose [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2013, 25(5): 121-126.

- [6] NIMPITIWAN N, HEYDT G T, AYYANAR R, et al. Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 634-641.
- [7] 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 of DG in distributed network considering relay protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 37-43.
- [8] 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. Analysis 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.
- [9] 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): 156-165.
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): 156-165.
- [10] 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 System, 2012, 36(23): 54-58.
- [11] 秦岭, 谢少军, 杨晨, 等. 太阳能电池的动态模型和动特性 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 19-26.
QIN Ling, XIE Shaojun, YANG Chen, et al. Dynamic model and dynamic characteristics of solar cells [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 19-26.
- [12] 陈慈萱. 电气工程基础 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

(编辑 刘杨)