

基于电流保护的逆变型分布式电源优化配置

李英量¹, 孙西瑶¹, 王德明², 蔡鹤鸣¹, 朱琦¹

(1. 西安石油大学电子工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

摘要: 逆变型分布式电源的并网使系统的供电模式从原来的单电源供电变为多电源供电, 给传统的继电保护带来了诸多挑战, 可能导致保护装置发生拒动或者误动。以具有低电压穿越特性的分布式光伏电源为研究对象, 分析了其接入配电网后对系统原有继电保护的影响, 在不增加配网继电保护投资成本的情况下计及电流保护、节点电压及位置分布等约束条件, 构建了考虑逆变型分布式电源并网容量和综合成本费用的多目标规划模型, 并利用粒子群算法在 IEEE 33 节点系统中进行算例分析。结果表明: 考虑电流保护约束的逆变型分布式电源配置方案能够确保故障发生时系统原有保护装置的正常动作, 验证了计及电流保护的必要性。

关键词: 逆变型分布式电源; 电流保护; 定容选址

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.001 中图分类号: TM771 文章编号: 1673-9140(2023)02-0001-08

Optimal configuration of inverter-interfaced distributed generation based on current protection

LI Yingliang¹, SUN Xiyao¹, WANG Deming², CAI Heming¹, ZHU Qi¹

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract: The grid-connected inverter-interfaced distributed generation transforms the power supply mode of the system from the original single power supply to a multi-power supply, which brings many challenges to the traditional relay protection, and may cause the protection device to fail or malfunction. This paper takes the inverter-interfaced distributed generation with low voltage ride-through characteristics as the research object and analyzes its influence on relay protection after it is connected to the distribution network. A multi-objective programming model considering the capacity and comprehensive cost of the inverter-interfaced distributed generation is constructed and also takes into account current protection, node voltage and location constraints without increasing the investment cost of the distribution network relay protection. The particle swarm optimization algorithm is used to analyze an example in the IEEE33-node system. The results show that the configuration scheme of the inverter-interfaced distributed generation considering the current protection constraints can ensure the regular operation of the original protection device of the system when the fault occurs, which verifies the necessity of considering the current protection.

Key words: inverter-interfaced distributed generation; current protection; sizing and location

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-11-18

基金项目: 陕西省科技计划基础研究项目(2021JM-404); 陕西省教育厅科研计划项目(21JK0843); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点项目(U20B2029); 国家自然科学基金面上项目(52174005); 西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目(YCS22113105)

通信作者: 李英量(1979—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统稳定控制、配电网规划等研究; E-mail: yingliang.li@hotmail.com

随着国家智能电网的不断推进和大力发展,以分布式光伏电源为主的逆变型分布式电源(inverter-interfaced distributed generation, IIDG)以高渗透率接入配电网,保障了用户的用电高需求。然而,当系统发生故障时,其接入会使配电网中产生双向流动的短路电流,可能出现传统的三段式电流保护发生误动或者拒动的情况,降低了保护装置的灵敏性,也会对配电网的安全可靠性造成一定的影响^[1,2]。因此,在不改变保护配置的情况下对分布式光伏电源定容选址问题进行研究时,应将继电保护要求作为其中的重要约束条件。

目前,国内外学者针对考虑电流保护约束条件的分布式电源(distributed generation, DG)优化配置问题进行了一系列研究,并提出了一些解决方案。文献[3]在考虑了电流保护约束条件的基础上,研究了DG接入配网时的准入容量和并网位置,但是没有考虑配置多个DG的情况。文献[4]构建了以投资成本、环境成本、网络损耗成本和电压偏移成本之和最小的目标函数,通过改进磷虾群搜索算法对不同类型分布式电源的定容选址模型进行了优化求解,保证了电网运行的经济性,但是并没有考虑到其接入对配网继电保护装置的影响。文献[5]针对DG并网可能导致系统原有继电保护装置拒动或误动的问题,提出了一种自适应电流保护方案,在DG接入与断开时设定不同的保护整定值,以确保保护装置的正常动作。但该方案会增加系统原有继电保护设备的投资成本,降低配网的经济效益。文献[6]以电流保护为约束条件,在不改变原有继电保护方案的基础上对传统型DG进行了优化配置,最大化地提高了DG的渗透水平。文献[7]构建了以有功网损最小化为目标,以节点电压、支路电流以及三段式电流保护为约束条件的数学模型,并在此基础之上对传统DG进行定容选址研究。但在分析短路电流约束条件时,只考虑了电流速断保护,而忽视了DG并网对电流Ⅱ段、电流Ⅲ段保护装置的影响。

另一方面,上述文献的研究对象大多为同步机型DG,而目前我国的分布式电源大多为通过电力电子逆变装置并网的IIDG,其控制策略与同步机型DG不同,导致二者对外输出的故障电流差异较大,

故需要研究更适合IIDG特性的定容选址方法。为此,文献[8]在不增加继电保护装置投资成本的情况下,利用传统的数学方法对IIDG的接入容量和接入位置进行了计算分析。文献[9]以10 kV双馈线配电网为例,考虑了IIDG接入配电网后对继电保护装置的影响,提出了一种计及配电网电流保护的IIDG配置方法。但二者均只给出了单个IIDG并网的最优配置方案,没有考虑到多个IIDG并网的情况。且传统的数学分析方法计算量大,对规模较大系统存在计算时间偏长的问题。

针对以上不足,本文充分考虑了智能算法收敛速度快、搜索能力强、求解电力系统规划问题时具有良好的适用性等特点,在不增加配电网设备的基础上对具有低电压穿越特性的多个IIDG进行优化配置。以光伏电源为例,建立了能够保证配置容量及经济成本均为最优的多目标数学模型,提出了一种利用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)求解多个IIDG准入容量和位置的优化方法,最后通过IEEE 33节点算例仿真得到了考虑电流保护和不考虑电流保护两种情况下的IIDG优化配置方案,结果对比后证明了考虑电流保护的必要性和智能算法求解多个IIDG定容选址时的优越性。

1 逆变型分布式电源控制策略

随着当前IIDG并网容量的不断增加,为有效预防IIDG脱网对配电网造成的不利影响,需要利用低电压控制策略对故障期间的IIDG进行处理^[10,11],保证配电网发生故障时IIDG会继续并网运行一段时间。具体的光伏发电低电压穿越要求如图1所示。

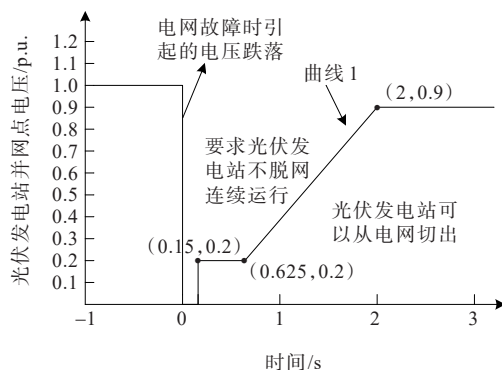


图1 光伏发电的低电压穿越要求

Figure 1 Low voltage ride-through requirements for IIDG

当配电网因发生故障导致系统电压跌落时,网侧逆变器采用定电流控制策略并以无功输出优先来支撑并网点电压。因此光伏电源流入配网的动态无功电流 I_T 应与 U_T 保持如下关系^[12]:

$$\begin{cases} I_T \geq 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N, 0.2 \leq U_T \leq 0.9 \\ I_T \geq 1.05 \times I_N, U_T < 0.2 \\ I_T = 0, U_T > 0.9 \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_T 为逆变型分布式光伏电源并网点的电压标幺值; I_N 表示逆变型分布式光伏电源接入配电网时的额定装机容量/ $(\sqrt{3} \times$ 并网点的额定电压值)。

传统的同步机型分布式电源通常等效为电压源与内阻抗串联的形式,其对外输出的故障电流可达 $(6 \sim 10)I_N$ ^[13,14],如图 2(a)所示, U_{DG} 为传统 DG 的等效电压, Z_{dg} 为等效内阻抗, I_{dg} 为 DG 对外输出的故障电流。

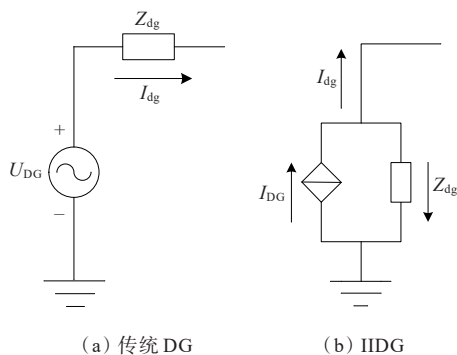


图 2 分布式电源的等值模型

Figure 2 Equivalent model of DG

而与传统 DG 相比, IIDG 的工作模式更加复杂,受控制策略的影响,当系统发生故障后其对外提供的短路电流不超过 $1.2 \sim 2.0$ p.u.^[15-16]。在构建 IIDG 等值模型时,通常需要将 IIDG 等效为压控电流源与阻抗并联的形式,如图 2(b)所示, I_{DG} 为不受最大幅值限制时的 IIDG 输出电流; Z_{dg} 为 IIDG 的等效阻抗,受故障点位置、过渡电阻等因素的影响; I_{dg} 为受幅值限制时的 IIDG 对外输出电流,电压跌落的程度会对其相位和并网点电压的夹角造成影响。

2 IIDG 并网对配网继电保护的影响

传统三段式电流保护的特点为阶梯式电流保护,工作原理简单、运行可靠、适应性强,能够快速

切除故障。基于这样的特性,三段式电流保护在电压等级为 35 kV 及以下的中低压配电网中有着广泛的应用^[17-19]。

IIDG 的接入会使配电网原有的结构发生变化,配网供电模式由原先的单电源供电变为多电源供电^[20]。线路发生故障时也会对短路电流产生影响,从而导致原有继电保护装置无法正常动作。

图 3 所示为简单的辐射状配电网系统图, $CB_1 \sim CB_5$ 分别为相应馈线上的继电保护装置,且 IIDG₁ 由母线 B 处接入配电网, IIDG₂ 由母线 C 处并网。

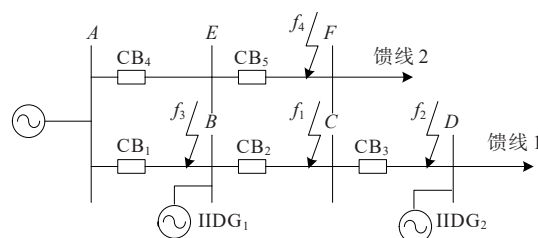


图 3 简单配电网的结构示意

Figure 3 Structural diagram of a simple distribution network

2.1 IIDG 接入位置下游发生短路故障

以图 3 中的 IIDG₁ 为例,当 IIDG₁ 接入点的下游 $f_1 \sim f_2$ 处发生短路故障时, IIDG₁ 提供的短路电流使流经保护装置 CB_2 的短路电流增大,同时延长了 CB_2 的保护距离,最终导致 CB_2 和 CB_3 的 I 段保护失去配合,不满足继电保护的选择性要求。

同时,当 IIDG₁ 接入位置下游发生短路时,也会对上游保护装置产生影响。流经 CB_1 的故障电流虽然只是由系统电源提供,但 IIDG₁ 的接入导致该部分的故障电流比未接入 IIDG₁ 时的小,因而可能会造成 CB_1 的 III 段保护拒动,失去了灵敏性。

2.2 IIDG 接入位置上游发生短路故障

当线路 AB 上 f_3 处发生短路时,保护装置均可正常动作。需要注意的是,当上游保护装置 CB_1 跳闸后,本线路的 IIDG 会继续向 f_3 处提供故障电流,从而造成永久性故障,影响系统的可靠性。

2.3 IIDG 接入位置的相邻馈线上发生短路故障

当馈线 2 上保护装置 CB_5 的后端 f_4 处发生短路时,流过 CB_4 的短路电流较 IIDG 接入前有所增加,增大的短路电流可能导致 CB_4 瞬时电流速断保护因躲不开而误动,从而失去了选择性。另一方

面,当 f_4 处发生短路时,保护装置 CB_1 将流过来自IIDG $_1$ 、IIDG $_2$ 的故障电流。若此电流足够大,可能导致 CB_1 误动并切除本线路,不满足选择性要求。

2.4 多个IIDG并网点中间线路上发生短路故障

当IIDG $_1$ 和IIDG $_2$ 的中间线路 f_1 、 f_2 处发生短路故障时,对IIDG $_2$ 而言,故障发生在其并网点的上游线路中,分析方法如文2.2中所示,配网中的保护装置均可正常动作;对IIDG $_1$ 而言,故障发生在其并网点的下游线路上,分析方法与文2.1中相同,即流经 CB_2 的短路电流会增大,导致 CB_2 的保护距离增加,失去了选择性。同时也可能造成 CB_1 的Ⅲ段保护拒动,不满足灵敏性要求。因此,当 f_1 、 f_2 处发生故障时,为保证系统的安全稳定运行,只需要确保IIDG $_1$ 并网点下游线路 CB_2 的Ⅰ段保护不误动,上游线路 CB_1 的Ⅲ段保护不拒动。

由上述分析可知,IIDG的接入会对配电网中原有继电保护的Ⅰ段和Ⅲ段产生不利影响,可能导致保护装置发生误动或拒动。因此在对IIDG进行优化配置研究时,需将电流保护作为重要的约束条件考虑进去。

3 IIDG并网优化配置数学模型

3.1 目标函数

在实际应用中,配电网接入的分布式电源不止一个。同时为了保证电力系统运行的可靠性、稳定性和经济性,在满足继电保护装置协调配合的情况下,构建了考虑IIDG并网容量和综合成本费用的多目标数学模型。

3.1.1 IIDG并网总容量

IIDG并网总容量如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n_{dg}} S_{dgi} \quad (2)$$

式中, S 为多个IIDG接入配电网的总容量, S_{dgi} 为第 i 个IIDG接入的容量值, $MV \cdot A$; n_{dg} 为接入配网的IIDG个数。

3.1.2 综合成本费用

综合成本主要包括IIDG的设备购买安装费用和年运行维护费用,可表示为

$$C_{total} = \sum_{i=1}^{n_{dg}} \left(\frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \times C_{inv} + C_{op} \right) \times S_{dgi} \quad (3)$$

式中, C_{total} 为IIDG的综合成本费用,万元; r 为贴现率,取0.1; T 为规划年限,设定为10 a; C_{inv} 为IIDG的购买和安装费用,设定为450万元/($MV \cdot A$); C_{op} 为IIDG的年运行维护费用,设定为50万元/($MV \cdot A$)。

3.1.3 标么化处理

由于构建的多目标优化配置模型要求IIDG的配置容量最大化,而IIDG的综合成本费用最小化,因此需要对二者进行标么化处理,统一实现向下寻优。

令IIDG配置容量的寻优范围为 $[0, S_{max}]$,则表征IIDG配置容量大小且向下寻优的目标函数 λ_s 可表示为

$$\lambda_s = \frac{S_{max} - S}{S_{max}}, \lambda_s \in [0, 1] \quad (4)$$

式中, S_{max} 为多个IIDG并网总容量的最大值, $MV \cdot A$ 。

能够反映出综合成本费用且向下寻优的目标函数 λ_c 可表示为

$$\lambda_c = \frac{C_{total}}{C_{total,max}}, \lambda_c \in [0, 1] \quad (5)$$

式中, $C_{total,max}$ 为综合成本费用的最大值,万元。

综上所述,本次所构建的多目标函数 F 可表示为

$$F = \min(\omega_1 \lambda_s + \omega_2 \lambda_c) \quad (6)$$

式中, ω_1 、 ω_2 为权重系数,分别设定为0.6、0.4。

3.2 约束条件

3.2.1 电流保护约束条件

当IIDG并网点下游发生故障时,IIDG流向短路点的故障电流不至于使保护误动,即

$$u_i < I_{op,i}^I, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中, u_i 为IIDG接入点下游各个支路检测到的三相短路电流; $I_{op,i}^I$ 为第 i 条支路的三段式电流保护Ⅰ段整定值。

当IIDG并网点下游发生故障时,IIDG会对上游的短路电流产生一定程度的削弱。该影响不应造成上游保护装置灵敏度的下降,从而拒动,可表示为

$$h_i^{(2)} > I_{op,i}^{III}, i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中, $h_i^{(2)}$ 表示在IIDG接入配网的情况下,发生故障后流经并网点上游各个支路的两相短路电流; $I_{op,i}^{III}$ 表

示第 i 条支路的 III 段保护整定值。

当 IIDG 并网点的相邻馈线上发生故障时, IIDG 向此馈线上保护装置提供的助增电流不应使其发生误动,即

$$q_i < I_{op,i}^I, i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中, q_i 为 IIDG 并网点相邻馈线上各支路的短路电流, $I_{op,i}^I$ 为第 i 条支路的电流保护 I 段整定值。

当 IIDG 并网点的相邻馈线上发生故障时, IIDG 接入支路上游保护检测到的流向故障点的短路电流不会造成保护装置 I 段误动,即

$$g_i < I_{op,i}^I, i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中, g_i 为 IIDG 并网点上游各支路检测到的反向电流, $I_{op,i}^I$ 为第 i 条支路的电流保护 I 段整定值。

3.2.2 电压约束条件

为保证逆变型分布式光伏电源能够正常运行, 其电压范围应为^[12]

$$0.9V_T \leq V_i \leq 1.1V_T, i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

式中, V_i 为配电网中各节点电压标么值; V_T 为系统电源节点的电压标么值, 通常为 1。

3.2.3 位置约束条件

配置多个 IIDG 时, 应避免系统电源的位置, 同时保证 IIDG 的接入位置各不相同, 即

$$X_{dgi} \neq X_{dgi}, i \neq j \quad (12)$$

式中, X_{dgi} 、 X_{dgi} 分别为第 i 、 j 个 IIDG 接入的位置。

3.3 算法求解流程

本文采用 PSO 对基于电流保护约束的 IIDG 并网模型进行求解, 算法求解流程如图 4 所示, 具体如下。

- 1) 输入系统参数、保护装置整定值; 设置 PSO 的种群数量 N 以及迭代次数 M 。
- 2) 生成初始种群 N 个。
- 3) 对各个粒子进行潮流计算、短路电流计算。
- 4) 计算当前粒子的适应度值, 比较所有粒子的最优位置, 找出个体位置最优的粒子和群体位置最优的粒子。
- 5) 判断是否满足最大迭代次数, 若是, 则输出最优种群及其适应度值; 否则执行步骤 6), 并返回步骤 3)。
- 6) 根据式 (13)、式 (14) 更新各个粒子的速度和位置:

$$v_{id} = \omega \cdot v_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \quad (13)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (14)$$

式中, v_{id} 和 x_{id} 分别为粒子的速度和位置; ω 为惯性因子, 通常取 $[0.2, 1.2]$; c_1 、 c_2 为加速系数, 二者一般取值相等, 且范围为 $[0, 4]$; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数; p_{id} 表示第 i 个变量的个体极值的第 d 维; p_{gd} 则表示全局最优解的第 d 维。

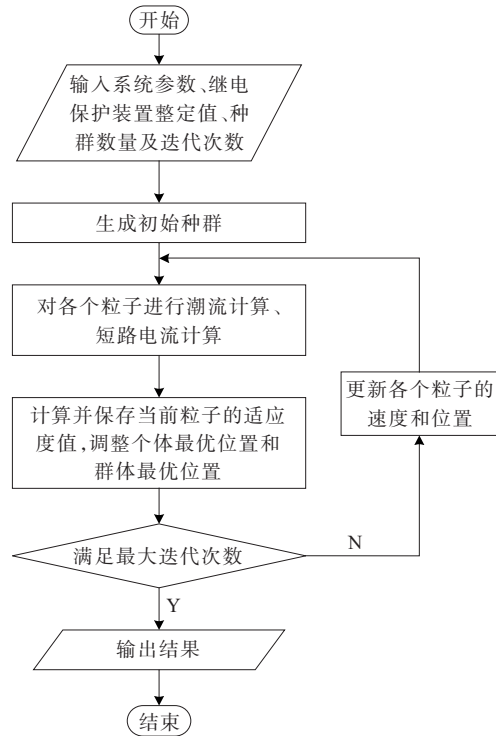


图 4 算法求解流程

Figure 4 Algorithm solving flowchart

4 算例分析

本算例采用的是典型辐射状配电网 IEEE 33 节点系统, 如图 5 所示。

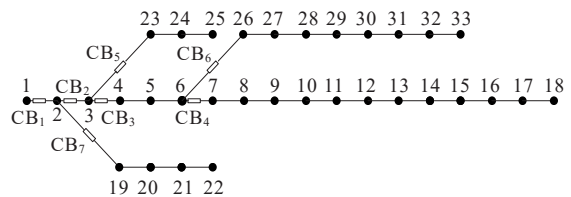


图 5 IEEE 33 节点配电网结构

Figure 5 Distribution network system diagram of IEEE 33 node

该辐射状配网系统包含 33 个节点和 32 条支路,因节点 1 为系统的电源节点,此处不接入分布式光伏电源,且单个分布式光伏电源的配置容量范围为 $0\sim 2\text{ MV}\cdot\text{A}$ 。本次算例仿真规定电压基准值 $U_B=12.66\text{ kV}$,功率基准值 $S_B=10\text{ MV}\cdot\text{A}$,系统总负荷为 $(3\ 715+j2\ 300)\text{ kV}\cdot\text{A}$ 。

考虑到继电保护装置的安全可靠性和实际运行的经济成本,并结合上文对电流保护约束条件的理论分析,本文在 IEEE 33 节点系统中的 7 条馈线上均安装了电流 I 段和 III 段保护装置,分别为 $CB_1\sim CB_7$,其保护整定值如表 1 所示。

表 1 保护装置 I 段、III 段整定值
Table 1 Settings of protection device

保护装置	$I_{op}^I/\text{p.u.}$	$I_{op}^{III}/\text{p.u.}$
CB_1	2.385 8	1.021 6
CB_2	2.313 6	0.693 8
CB_3	2.013 1	0.621 5
CB_4	0.952 9	0.289 4
CB_5	1.865 4	0.255 4
CB_6	1.303 3	0.289 4
CB_7	1.693 2	0.097 9

4.1 IIDG 并网的优化配置方案

本次算例仿真采用 PSO 智能算法对 IIDG 并网个数、位置及容量进行优化配置,初始种群 $N=50$,迭代次数 $M=200$ 。通过 Matlab 编程环境对考虑(方案 1)和不考虑(方案 2)电流保护约束条件 2 种方案下的目标函数进行求解,结果如表 2 所示。

表 2 IIDG 配置位置及容量
Table 2 The access capacity and placement of IIDGs

方案	IIDG 接入位置	IIDG 接入容量/ ($\text{MV}\cdot\text{A}$)	IIDG 并网总容量/ ($\text{MV}\cdot\text{A}$)	综合成本费用/ 万元
1	7	1.969 0	6.418 5	790.989 3
	9	1.999 5		
	12	1.958 7		
	23	0.491 3		
	11	1.947 3		
	12	1.977 3		
2	16	1.946 7	8.333 9	1 027.000 0
	23	0.470 4		
	30	1.992 1		

由表 2 可知,方案 1 下的 IIDG 配置容量及综合成本费用均比方案 2 的值小,这是因为电流保护约束条件对 IIDG 的配置起到了一定的限制作用。虽然配置容量减小,但能够保证系统中继电保护装置不发生拒动和误动,满足继电保护的基本要求。因此,在对 IIDG 进行优化配置时,计及电流保护约束条件是十分必要的。

本算例的迭代曲线如图 6 所示,可以看出,迭代次数达到 101 时结果收敛。此时对应的最优适应度值(目标函数值 F)为 0.443 3。

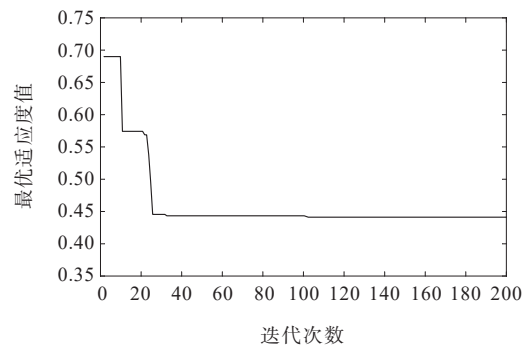


图 6 最优适应度值迭代变化曲线

Figure 6 Iterative change curve of optimal fitness value

4.2 算例验证

为验证所提方法的正确性,将文 4.1 中考虑电流保护约束的 IIDG 优化配置方案 1 和不考虑电流保护约束的方案 2 均代入 IEEE 33 节点算例模型中,结合文 3.2.1 中内容,分别分析出 2 种方案下的电流保护约束条件,同时对模型中的故障电流进行求解。具体情况如表 3 所示。

对表 3 中方案 1 进行分析可得,故障电流与保护装置整定值之间的关系均符合电流保护约束条件,满足了继电保护的选择性和灵敏性。特别是在约束条件 5、6 中,故障电流皆略大于整定值,这说明约束条件限制了 IIDG 的接入,确保了 IIDG 并网后不会造成保护装置拒动。

而方案 2 中,序号 5、6 中的故障电流与保护装置整定值不符合电流保护约束条件的大小关系,即在该方案配置下当配网发生故障时,保护装置 CB_4 、 CB_5 会发生拒动,不满足继电保护的灵敏性要求。因此,在对 IIDG 进行优化配置研究时,计及电流保护约束是十分必要的。

表3 IIDG接入后短路电流约束反馈情况

Table 3 The feedback situation of short-circuit current restraint after IIDG's connection

方案	序号	约束条件	故障电流值/ p.u.	保护装置 整定值/p.u.
1	1	$I_{CB3} < I_{op,CB3}^I$	0.483 7	2.013 1
	2	$I_{CB4} < I_{op,CB4}^I$	0.332 2	0.952 9
	3	$I_{CB5} < I_{op,CB5}^I$	0.407 8	1.865 4
	4	$I_{CB6} < I_{op,CB6}^I$	0.103 5	1.303 3
	5	$I_{CB4}^{(2)} > I_{op,CB4}^{III}$	0.294 3	0.289 4
	6	$I_{CB5}^{(2)} > I_{op,CB5}^{III}$	0.361 2	0.255 4
2	1	$I_{CB3} < I_{op,CB3}^I$	0.571 3	2.013 1
	2	$I_{CB4} < I_{op,CB4}^I$	0.314 3	0.952 9
	3	$I_{CB5} < I_{op,CB5}^I$	0.467 5	1.865 4
	4	$I_{CB6} < I_{op,CB6}^I$	0.218 4	1.303 3
	5	$I_{CB4}^{(2)} > I_{op,CB4}^{III}$	0.243 6	0.289 4
	6	$I_{CB5}^{(2)} > I_{op,CB5}^{III}$	0.165 1	0.255 4
	7	$I_{CB6}^{(2)} > I_{op,CB6}^{III}$	0.301 4	0.289 4

图7所示为方案1和方案2的节点电压曲线。由方案1的曲线可知,IIDG并网后各节点的电压幅值(p.u.)最大为1,最小则不低于0.92,有效提高了各节点的电压水平,进一步验证了本文所提方法的有效性和正确性。

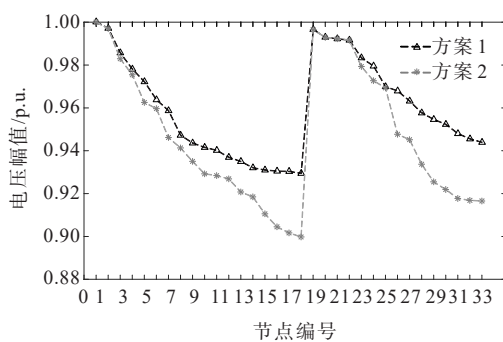


图7 节点电压曲线

Figure 7 Voltage value of each node

5 结语

本文以具有低电压穿越特性的分布式光伏电源为研究对象,在不改变配网保护配置的情况下提出了一种基于电流保护约束的多个分布式光伏电源优化配置方法。算例结果表明:

1) 当系统发生故障时,IIDG受控制策略的影

响,其对外提供的短路电流偏小,更容易导致电流Ⅲ段保护拒动,从而对保护装置的灵敏性产生不利影响。

2) 在考虑电流保护约束条件的前提下求解IIDG的最佳配置容量和位置,不用重新对系统原有继电保护值进行整定,也不必增加额外的设备投资成本。同时,所得优化配置方案确保了保护装置不会发生拒动或者误动,证明了计及电流保护的必要性,维护了配网的安全、稳定和经济运行。

本次研究的配电网结构为单侧电源供电的辐射状网络,未来将进一步对环式供电、双回放射式等复杂网络进行研究。

参考文献:

- [1] 贾耕涛,翟学,杨雪瑞.考虑故障特性和保护约束条件的分布式电源准入容量研究[J].电力科学与技术学报,2016,31(4):89-95.
JIA Gengtao, ZHAI Xue, YANG Xuerui. Research on penetration level of DG considering fault characteristics and relay protection constraint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2016,31(4):89-95.
- [2] 刘凯诚,钟鸣,曾平良,等.考虑分布式可再生能源和储能智能配电网可靠性评估综述[J].电测与仪表,2021,58(7):1-11.
LIU Kaicheng, ZHONG Ming, ZENG Pingliang, et al. Review on reliability assessment of smart distribution networks considering distributed renewable energy and energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(7):1-11.
- [3] 卢姬,常俊晓,张云阁,等.考虑DG不确定性的主动配电网两阶段无功机会约束优化方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(21):28-35.
LU Ji, CHANG Junxiao, ZHANG Yunge, et al. Two-stage reactive power chance-constrained optimization method for an active distribution network considering DG uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(21):28-35.
- [4] 高立克,陈绍南,秦丽文,等.基于混合整数非线性方法的配网可靠性规划[J].高压电器,2022,58(9):182-189.
GAO Like, CHEN Shaonan, QIN Liwen, et al. Reliability planning of distribution network based on mixed integer nonlinear method[J].High Voltage Apparatus, 2022,58(9): 182-189+196.
- [5] 严艺方.分布式电源接入下配电网电流保护策略研究[D].济南:山东大学,2020.

- YAN Yifang. Research on current protection strategy of distribution network under distributed power supply access[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [6] ZHAN H, WANG C, YANG W, et al. Relay protection coordination integrated optimal placement and sizing of distributed generation sources in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 24(20):55-65.
- [7] 闫群民, 穆佳豪, 马永翔, 等. 分布式储能应用模式及优化配置综述[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2):67-74.
- YAN Qunmin, MU Jiahao, MA Yongxiang, et al. Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2):67-74.
- [8] 李俊杰, 邓嘉明, 姜世公, 等. 考虑用户差异化可靠性需求的配电网规划方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5):74-82.
- LI Junjie, DENG Jiaming, JIANG Shigong, et al. Distribution network optimization planning method based on differential reliability demand[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5):74-82.
- [9] 张晓辉, 李阳, 钟嘉庆, 等. 基于安全因子及协同因子的源网多目标协调规划[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9):1842-1856.
- ZHANG Xiaohui, LI Yang, ZHONG Jiaqing, et al. Multi-objective coordinated planning of source network based on safety factor and coordination factor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9):1842-1856.
- [10] FUSCO G, RUSSO M.A decentralized approach for voltage control by multiple distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4):3115-3127.
- [11] 魏斌, 王薇, 王加祥, 等. 应用多步模型预测控制提高光伏发电低电压穿越能力研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(10):1375-1381.
- WEI Bin, WANG Wei, WANG Jiexiang, et al. Research on application of multi-step model predictive control to improve low voltage ride through ability of photovoltaic power generation[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(10):1375-1381.
- [12] GB/T 19964—2012. 光伏发电站接入电力系统技术规范[S].
- GB/T 19964—2012. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system[S].
- [13] 井淳子. 逆变器型DG接入配电网对保护的影响及对策研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- JING Chunzi. Influence of inverter DG connected to distribution network on protection and its countermeasures [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [14] 全蕾, 詹红霞, 张勇, 等. 考虑多DG接入的配电网自适应电流主保护方案[J]. 智慧电力, 2021, 49(8):63-69.
- QUAN Lei, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, et al. Adaptive current main protection scheme of distribution network accessed with multiple distributed generations[J]. Smart Power, 2021, 49(8):63-69.
- [15] CHEN G B, LIU Y Q, YANG Q F. Impedance differential protection for active distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1):25-36.
- [16] MARKOVIC U, CHRYSOSTOMOU D, ARISTIDOU P, et al. Impact of inverter-based generation on islanding detection schemes in distribution networks[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 190:106610.
- [17] ALI A, KEERIO M U, LAGHARI J A. Optimal site and size of distributed generation allocation in radial distribution network using multi-objective optimization[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 9(2):404-415.
- [18] 雷勇. 基于BFPSO算法的分布式电源优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1):115-119.
- LEI Yong. Optimized allocation of distributed generation based on BFPSO[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1):115-119.
- [19] 谭振龙, 钱相宜, 蔡文畅. 配置高抗站的海上风电长距离海缆送出继电保护分析[J]. 中国电力, 2021, 54(8):175-181.
- TAN Zhenlong, QIAN Xiangyi, CAI Wenchang. Analysis of relay protection for offshore wind power long-distance submarine cable transmission with high resistance station [J]. Electric Power, 2021, 54(8):175-181.
- [20] HUANG Y S, JIANG Y Q, WANG J. Adaptability evaluation of distributed power sources connected to distribution network[J]. IEEE Access, 2021, 9: 42409-42423.