

提升分布式电源接纳能力的配电网一次设备改造

程超¹,高厚磊¹,邹贵彬¹,王娟娟²

(1. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

2. 国网潍坊市供电局, 山东 潍坊 261014)

摘要:随着分布式发电(DG)的快速发展,如何评估和提升现有配电网对DG的接纳能力是一个亟待解决的问题。从DG接入对配电网一次设备电流耐受能力的影响入手,以短路电流不越限为约束条件,提出计算最大DG准入容量的数学模型。以提升配电网接纳DG能力为目标,提出针对一次设备的短路电流限制措施和改造方法。结合实际配电网结构和参数,计算得出潮流、短路电流以及最大DG准入容量,给出了相应的一次设备改造方案,并对改造方案进行了经济性分析和可行性评价。

关键词:配电网;分布式电源;DG接纳能力;一次设备改造;校验;短路电流

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.015

0 引言

随着能源问题的日益突出,大规模的分布式电源(DG)接入配电网成为必然的趋势。而DG的接入改变了配电网的潮流分布、节点电压、支路电流、网络损耗等特性,其容量增大时会影响到配电网的安全稳定运行。因此,为了适应未来配电网中更大容量的DG接入,必须通过配电网的改造来提升其接纳DG的能力。

目前国内外学者针对DG对配电网的影响进行了很多研究。文献[1]基于链式配电网、分布式恒功率静态负荷,结合多个仿真试验分析了分布式发电对配电网稳态电压分布的影响;文献[2]运用改进前推回代法潮流计算程序对其接入放射状配电网前后的电压分布、有功损耗进行精确计算,总结了不同类型的DG在配电网中的接入位置、出力、布局等改变时电压及功率损耗的变化规律。上述研究阐明了DG对配电网的影响机理,为求得DG的最大准入容量提供了研究的基础。文献[3]从DG的接入位置、容量及接入方法等因素对配电网的影响的角度出发,形成了模型的电压约束、潮流约束以及DG的容量约束,采用遗传算法和牛顿-拉夫逊法求解模型,求得了DG最大准入容量;文献[4]从保护配合性出发,针对DG的准入容量问题,将短路约束条件表达为DG准入容量与其次暂态电抗之间的函数关系,提出了计及短路电流约束的准入容量计算原理和模型。然而这些研究思路限制了DG接入配电网的研究方向,即基于配电网的一成不变,将研究的主

体固定在DG上,针对DG规定了固定的接入容量,不能满足日益增长的DG接入规模对配电网带来的冲击和影响。

目前以配电网为主体的DG接入研究非常少见。文献[5]提出了针对分布式光伏接入的配电网改造的方法。该方法以提高DG接入容量为目标,以潮流分布、电压分布、电能质量等为限制条件,利用层次分析法对分布式光伏电源的接入、消纳和维持系统稳定等方面提出了配电网的改造措施,然后综合考虑改造的经济效益,给出了总体的改造方案。但其只针对光伏发电,仅从变电站间隔、线路、储能和无功补偿装置4个方面对配电网进行改造,忽略了DG接入配电网后短路电流的改变对一次设备的冲击和影响。

因此,本文提出了基于短路水平提高DG接纳能力的配电网一次设备改造思路。首先,利用故障叠加法计算短路电流,从而得到配电网的短路电流水平;然后以短路电流不越限为约束条件建立优化模型,计算得到基于一次设备耐受短路电流能力考量的最大DG准入容量;以此为基础,提出提升配电网接纳DG能力的目标、方法以及一次设备改造方案;最后以山东某地区配电网为例,给出了该配电网适应大容量DG接入的一次设备改造方案。

1 配电网短路电流水平的计算

配电网的短路电流水平是指在发生短路故障时,配电网线路中出现的最大短路电流,以此校验配电网中一次设备的耐受能力。考虑到在各种短路情况中,通常三相接地短路的短路电流最大^[6-7],因此本文中只针对三相短路的情况进行短路电流水平的计算和分析。

使用叠加法计算复杂网络的短路电流比较方

收稿日期:2015-12-08;修回日期:2016-05-06

基金项目:山东省电力公司重点科技项目(SGSDWF00YJJS-1400563)

Project supported by the Key Scientific and Technological Project of State Grid Shandong Power Company(SGSDWF00YJJS1400563)

便。叠加方法将短路故障的网络看作正常状况和故障状况的叠加^[8]。首先利用潮流计算方法计算出正常情况下的电流分布,此为正常分量;然后将所有电源接地,在故障点增加一个反向电势,方向为短路点到地,大小为潮流计算得出的该点的电压值,这样计算出的电流分布为故障分量。将正常分量与故障分量相加,即得到短路时线路的电流分布。

正常分量可以由潮流计算求得,针对故障分量的计算方法简介如下^[9]。

1.1 短路电流故障分量的计算

配电网中的节点一般只与相邻节点有连接支路,因此节点导纳矩阵比较稀疏,很容易形成。在利用节点导纳矩阵求解短路电流时,实际是利用该矩阵计算出与短路点相关的节点阻抗矩阵的第 f 列(假设短路节点为节点 f),即:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1f} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{f1} & \cdots & Y_{ff} & \cdots & Y_{fn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nf} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_f \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\Delta U_1, \cdots, \Delta U_n$ 分别为节点 f 通过单位电流时节点 $1, \cdots, n$ 的电压值。若已形成故障网络的节点阻抗矩阵,只有短路节点 f 有注入电流 I_f ,方向由短路节点到“地”,则节点电压方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_f \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1f} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{f1} & \cdots & Z_{ff} & \cdots & Z_{fn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nf} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1f} \\ \vdots \\ Z_{ff} \\ \vdots \\ Z_{nf} \end{bmatrix} (-I_f) \quad (2)$$

其中, $Z_{1f}, \cdots, Z_{nf}$ 的模值分别等于式(1)求得的 $\Delta U_1, \cdots, \Delta U_n$ 的模值。

不考虑接地电阻,则:

$$I_f = U_{f0} / Z_{ff} \quad (3)$$

其中, U_{f0} 为潮流计算得出的非故障状况下的短路节点电压。

将 I_f 代入式(2),可以得到任意支路的故障电流分量为:

$$I_{ij} = \frac{\Delta U_i - \Delta U_j}{Z_{ij}} \quad (4)$$

然后将正常电流分量和故障电流分量叠加即得到短路电流稳态值。

1.2 短路计算中 DG 的简化处理

根据发电原理和并网方式, DG 可以分为旋转型和逆变型 2 种^[10], 二者的暂态过程不同。在短路计算中, 旋转型 DG 可以等效为电压源和阻抗串联的模型, 而对于逆变型 DG 应等效为电流源与阻抗并联或电压源和阻抗串联的模型。但逆变型 DG 的短路电流不会超过其 2 倍的额定电流, 一旦过限,

保护将会动作切断其与电网的连接。

为了能够快速求解出短路电流, 本文将接入的 DG 均等效为一个电压源和一个阻抗的串联, 并根据 DG 对短路电流的注入容量的不同, 用不同的阻抗值加以区分^[11]。

这样在短路发生时, 电压源被短路, 就相当于 DG 接入节点增加了一个对地的导纳, 因而更新后的节点导纳矩阵的维数不变, 只需要将相应节点的自导纳加上 DG 的导纳值。

2 配电网允许的最大 DG 准入容量计算模型

DG 接入配电网会造成配电网电流的变化, 且其容量越大, 对配电网电流水平的影响越剧烈。计算特定配电网的 DG 实际接纳能力能够保障 DG 接入配电网的一次设备耐受能力, 因此研究配电网的最大准入容量具有重要意义。

2.1 模型目标函数

假设 DG 的接入对配电网电压和继电保护的影响不会超过限制, 而其造成的短路电流对一次设备的影响未知, 由此基于一次设备的耐受能力, 建立求取 DG 最大准入容量的数学模型, 该模型的目标是 DG 最大的装机容量, 即:

$$\max S_{DGm} \quad (5)$$

其中, S_{DGm} 为 DG 的装机容量。

2.2 模型的约束

a. DG 出力约束。

由于 DG 出力具有不确定性, 为了确保以最大准入容量的 DG 接入配电网后一次设备能够耐受改变后的极限电流水平, 规定模型中的 DG 出力为最大, 即其装机容量, 如式(6)所示。

$$S_{DG} = S_{DGm} \quad (6)$$

其中, S_{DG} 为 DG 的出力。

b. 潮流方程约束^[4]。

在配电网安全运行中, DG 接入后的配电网的有功功率方程、无功功率方程以及节点电压方程如下:

$$P_{i+1} = P_i - R_{i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} - P_{L(i+1)} + P_{DG(i+1)} \quad (7)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - X_{i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} - Q_{L(i+1)} + Q_{DG(i+1)} \quad (8)$$

$$U_{i+1}^2 = U_i^2 - 2(R_{i+1}P_i + X_{i+1}Q_i) + (R_{i+1}^2 + X_{i+1}^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (9)$$

其中, P_i, Q_i 和 P_{i+1}, Q_{i+1} 分别为节点 i 和 $i+1$ 的有功功率和无功功率; R_{i+1}, X_{i+1} 分别为节点 i 和节点 $i+1$ 之间的电阻与电抗; U_i 和 U_{i+1} 分别为节点 i 和 $i+1$ 的电压; $P_{DG(i+1)}, Q_{DG(i+1)}$ 分别为节点 $i+1$ 处 DG 的有功功率和无功功率; $P_{L(i+1)}, Q_{L(i+1)}$ 分别为节点 $i+1$ 处的有功负荷和无功负荷。

式(6)—(9)构成了 DG 最大准入容量模型的等式约束。

c. 正常工作电流约束。

DG 接入后,电压分布的变化导致了电流分布的变化,因此必须要求配电网支路电流不超过一次设备的工作电流耐受能力,即:

$$I_k \leq I_{sk} \quad (10)$$

其中, k 为配电网中需校验的一次设备编号; I_k 为相应的支路电流; I_{sk} 为一次设备允许的最大工作电流。

d. 短路电流约束。

DG 的接入对配电网短路电流也会产生一定的影响,因此要求配电网的短路电流不超过一次设备的短路电流耐受能力,即:

$$I_{dk} \leq I_{chk} \quad (11)$$

其中, I_{chk} 为一次设备允许的最大短路电流; I_{dk} 为相应的短路电流。

式(10)、(11)构成了 DG 最大准入容量模型的不等式约束。

对于特定的配电网,利用该模型就可以计算在保证一次设备安全运行条件下的最大 DG 接入容量,从而利用该容量审核 DG 接入方案的合理性和安全性。

在实际中,当配电网以求得的最大准入容量接入 DG 后,在极限情况下,配电网的一次设备耐受能力几乎饱和,濒临危险区,此时的电流及短路电流裕度是不够的。因此应该将计算得到的最大准入容量适当减少。考虑到 DG 出力的不确定性和同时率^[12],减少的比例不宜太大,需要兼顾经济性和安全性。

3 提升配电网接纳能力的目标和方法

DG 的接入改变了配电网的潮流分布和电压分布,从而改变了各支路的电流分布;DG 接入的位置和短路的类型不同,短路电路改变的大小幅度会有所不同;同时,由于 DG 的自身特性不同(旋转型和逆变型),在短路瞬间的暂态电流也会有所不同。这些因素都会对配电网短路电流产生不同程度的影响。

短路电流的改变不仅影响继电保护的動作,也对一次设备的安全可靠运行带来了新的挑战。目前配电网的短路电流水平已经接近了开关设备的额定电流,所以 DG 的加入对于短路电流的助增作用可能会使短路电流超过设备的额定耐受范围,从而造成开关设备无法正常开断、变压器线路等设备故障等问题。

因此提升配电网的接纳能力,提高 DG 的准入容量,要着眼于一次设备的改造和升级,这一方面要限制配电网的短路电流幅值,另一方面要提高系统中一次设备的短路电流耐受能力。

限制短路电流幅值的方法包括:变电站母线分列运行,采用高阻抗设备,采用限流电抗器,加装变压器中性点小电抗接地等^[13]。

提高一次设备的短路电流耐受能力,具体要从变电站出线、输电线路、变压器、断路器等设备入手,比如提高一次设备的耐受短路电流额定值、提高开关设备的遮断能力等。

3.1 限制短路电流幅值的方法

(1)变电站母线分列运行。

打开母线分段开关,将母线分列运行,可以增大系统阻抗,有效降低系统的短路电流水平,该措施实施方便。

(2)采用高阻抗设备。

采用高阻抗变压器是控制下一级电网短路电流的有效措施,特制的高阻抗变压器通过改变变压器内部结构可以获得更高阻抗。采用高阻抗变压器可以减少电抗器设备的使用,从而减少了检修维护工作量,但高阻抗变压器的价格要高于普通变压器。

(3)采用串联电抗器。

采用串联电抗器是将一个固定电抗值的电抗器串联接入线路,这是一种传统的限流技术,运行方式简单、安全可靠,但会影响电力系统的潮流分布且增加了无功损耗,对系统的稳定性也有一定影响。串联电抗器一般安装于母线联络处或线路接入处。

(4)加装变压器中性点小电抗接地。

在变压器中性点加装小电抗器施工便利,投资也较小,小电抗器的阻抗值在零序网络中将被放大,因此在单相短路电流过大而三相短路电流相对较小的场合很有效。

3.2 提高短路电流耐受能力一次设备校验与改造

(1)线路改造分析。

当 DG 接入配电网后,正常工作电流和短路电流的改变可能使得原有线路的线径不能满足电能传输的要求。线路线径选取的依据是 DG 接入后出现的最大负荷电流,同时利用经济电流密度对线径进行校核。

如果原有线路的最大允许电流大于 DG 接入后的最大负荷电流,则无需更换线路,否则有必要改造线路,通常采用扩大线径的方式,使之满足需求。

线路改造施工范围较大,工期较长,因此改造成本较高。

(2)断路器改造分析。

对于断路器的选取原则^[14]为:

a. 按正常工作条件选择额定电压和额定电流;

b. 按短路情况来校验电器设备的动稳定和热稳定;

c. 按装置地点的三相短路容量来校验高压断路

器的遮断容量。

在校验中主要比较断路器的额定开断电流与安装处的最大短路电流的大小。如果 DG 接入后的电流水平超过配电网内原有断路器的额定值,则需要更换更大标称值的断路器。对于隔离开关、互感器等设备的校验和改造也与断路器相同。

开关设备的更换难度和成本根据其自身结构和安装位置有所差别。

(3)变压器改造分析。

DG 接入配电网后在功率逆流时对变压器带来的冲击影响较大,短路电流水平的增大也会损害变压器的绝缘性能和抗短路电流的能力。校验原则为变压器容许的短路电流大于实际最大短路电流。

通常变压器的增容和抗短路改造措施主要包括铁芯、绕组、绝缘件的更换^[15]。由于变压器的造价较高,在情况严重时才可以考虑更换新的变压器。

4 算例分析

以山东某地区 10 kV 线路为例,研究该线路在接入大容量 DG 后的改造方案。该线路模型如图 1 所示,线路主要一次设备型号如表 1 所示,线路的阻抗和负荷参数分别如表 2、3 所示。由表 2 可知,该线路的总负荷为 5 370 kV·A。在计算中,选取的基准电压为 10 kV,基准功率为 10 MV·A,故基准电流为 1 kA。

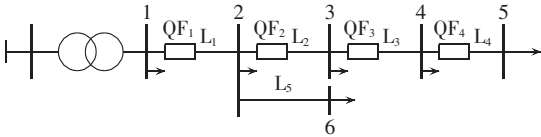


图 1 某地区 10 kV 配电网结构
Fig.1 Structure of a 10 kV distribution network

表 1 一次设备型号与安装位置

设备	型号	安装位置
主变压器	TTH-40000/110-Y1	10 kV 母线
断路器	VD41212-31M	节点 1
	FZW28-12/630-20	节点 2 和节点 4
	LGFZ-12/630-12.5Z	节点 3
线路	LJ-240	支路 L ₁
	LJ-185	支路 L ₂ 、L ₃ 、L ₄ 和 L ₅

表 2 线路参数
Table 2 Line parameters

支路编号	距离/m	阻抗/ Ω
L ₁	1000	0.035+j0.013
L ₂	7000	0.245+j0.091
L ₃	5000	0.175+j0.065
L ₄	5100	0.1785+j0.0663
L ₅	3500	0.1225+j0.0455

表 3 节点负荷
Table 3 Nodal loads

节点	总功率/ (kV·A)	有功功率/kW (无功功率/kvar)
2	4 430	4 312+j876
3	510	500+j101.5
4	80	78.4+j15.9
5	160	156.8+j31.8
6	190	186.2+j37.8

4.1 电流计算仿真

在节点 3 接入发电功率为 0.2+j0.2 p.u. 的 DG 前后,线路各支路的电流分布和节点 3 发生三相短路时的短路电流分布分别如图 2 和图 3 所示。

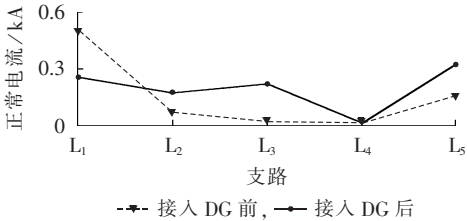


图 2 正常状态下的电流分布
Fig.2 Current distribution in normal condition

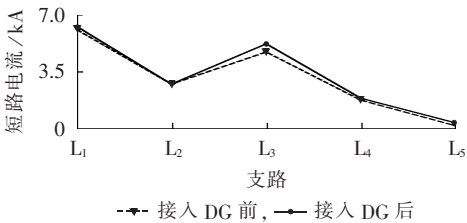


图 3 短路电流分布
Fig.3 Short circuit current distribution

由图 2 和图 3 可以看出,DG 的接入不仅会改变整个网络的电流分布,也会引起短路电流幅值的变化。可以预见,当较大容量的 DG 接入配电网时,正常电流和短路电流的变化都会对一次设备的耐受能力提出严峻考验。

4.2 准入容量的计算

利用第 2 节中的数学模型,针对该 10 kV 线路进行最大准入容量的计算。在该线路中,接入的 DG 最大容量主要受到线路的载流量、断路器的遮断能力、变压器允许短路电流等因素的限制,其简要的数学表达如下:

$$\max S_{DGm}$$
$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} I_1 \leqslant I_{L_{xu}} \\ I_1 \leqslant I_{t_{xu}} \\ I_d \leqslant I_{ekd} \end{cases} \quad (12)$$

其中, I_1 为线路在正常状态下可能出现的最大电流; I_t 、 I_d 分别为变压器、断路器可能出现的最大短路电流; $I_{L_{xu}}$ 为线路允许的最大载流量; $I_{t_{xu}}$ 为变压器允许的最大短路电流; I_{ekd} 为断路器的额定开断电流。

为了便于计算,本文假设 DG 的有功与无功发电功率相同,节点类型均为 PQ 型,DG 的短路等效阻抗为 0.1 p.u.。

利用潮流计算和短路电流的计算公式,逐个变换各节点 DG 的接入位置和三相短路发生的位置,最终利用式(12)计算得到满足一次设备耐受能力的最大 DG 接入容量为 0.24+j0.24 p.u.。

可知,当该配电网接入超过 0.24+j0.24 p.u. 的 DG 时,该配电网内的某些设备将会因电流或短路电流超过其耐受能力而影响其正常安全运行。

4.3 设备校验和改造

设该线路目前要接入的 DG 容量为 0.4+j0.4 p.u.(大于最大准入容量),通过短路电流的计算,变换 DG 的接入位置和三相短路发生的位置,求得各设备安装处可能出现的最大正常电流和最大短路电流,以此来校验该线路中的设备,其校验结果如下。

a. 线路。

DG 接入前后,各支路可能出现的最大正常电流见表 4。

表 4 线路的校验结果
Table 4 Check results of lines

支路	型号	额定载流量/A	支路电流/A		是否需要改造	更换型号
			接入 DG 前	接入 DG 后		
L ₁	LGJ240	545	502.4	12.7	否	—
L ₂	LGJ185	460	70.4	419.2	否	—
L ₃	LGJ185	460	22.6	467.2	是	LGJ240
L ₄	LGJ185	460	14.9	366.0	否	—
L ₅	LGJ185	460	159.4	782.7	是	LGJ400

从表 4 的计算结果可以看出,DG 接入对于支路电流有显著的影响,根据校验要求,长期流经线路的电流必须小于线路的额定载流量^[16]。由此确定是否需要进行改造。由表 4 中数据可以看到支路 L₃ 和 L₅ 需要改造,更换的型号分别为 LGJ240 和 LGJ400。

b. 断路器等开关设备。

从表 5 的计算结果可以看出,DG 接入对于支路短路电流有显著的影响,根据校验要求,断路器的遮断能力必须大于其流经的最大短路容量,即最大开断电流大于最大的短路电流。由此确定是否需要进行改造。由表中数据可以看到断路器 QF₁ 的开断电流小于其可能出现的最大短路电流,因此需要更换,更换的型号为 VD4-1212-40M。

表 5 断路器的校验结果
Table 5 Check results of breakers

断路器	额定开断电流/kA	接入 DG 后的最大短路电流/kA	是否需要改造
QF ₁	31.5	31.8	是
QF ₂	20	9.7	否
QF ₃	20	17.03	否
QF ₄	20	5.95	否

c. 变压器。

变压器的允许短路电流一般不超过额定电流的 18~25 倍。计算得到的变压器一次侧可能出现的最大短路电流为 31.8 kA,小于其允许的短路电流水平,因此不需要进行更换,但是,短路电流较之前有了较大的提升,这将会逐渐降低变压器的性能。因此需要加强变压器的保护措施和状态的在线监测。

4.4 改造方案的分析和评价

(1)技术性分析。

通过电流耐受能力的校验后,对一次设备针对性的改造和升级显著提升了本案例中配电网的 DG 接纳能力;同时,改造过程中,各一次设备对电流和短路电流留有足够的裕度,能够保证接入大容量 DG 后配电网在故障情况下的坚强支撑和恢复能力。

(2)经济性分析。

① 成本计算。

线路改造的单位造价为 30 万元/km,断路器的单位采购和安装成本为 10 万元/台^[17],则本案例中配电网改造的经济性如表 6 所示。

表 6 改造方案的经济性分析
Table 6 Economical analysis of retrofitting scheme

改造项目	成本/万元
变压器	0
断路器	10
线路	255
总计	265

② 效益分析。

配电网改造的投资虽然减少了电网公司的售电效益,也增加了调度部门的工作,但这一改造具有很大的社会效益和环保效益。

a. 社会效益。

改造方案使大容量 DG 安全地接入既有系统,提高了供电的可靠性,减少了断电次数,降低了发电成本,减少了居民的用电消费。这些都体现了 DG 接入对于提高居民生活质量,刺激可再生能源发电产业升级与技术革新,营造资源节约型环境友好型社会风气等方面的效益。

b. 环保效益。

大容量 DG 的接入降低了系统中排放污染物较多的火电的比重,减少了化石燃料的消耗;在发电过程中大量减少了碳、硫氮氧化物等对环境有害的物质,减少了环境污染,同时也减少了政府有关部门治理污染的费用。

(3)可行性分析。

案例中的改造主要为断路器和线路的更换,实施难度不大。配电网改造虽然在短期内成本远大于收益,但电网公司作为国有企业,应该承担起环境保护和社会责任,因此适应 DG 接入的配电网一次设备改造可行且必行。

5 结语

本文考虑电流水平,针对配电网的 DG 接纳能

力的提升,提出了配电网中的一次设备的校验改造方法。该方法从一次设备对电流的耐受能力的角度,指明了 DG 接入配电网的可行性的新方向。同时,配电网通过改造主动地适应大容量 DG 接入的思想也将促进分布式发电在配电网的应用和发展。

参考文献:

- [1] 王志群,周守真,周双喜,等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):56-60.
WANG Zhiquan,ZHU Shouzheng,ZHOU Shuangxi,et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(16):56-60.
- [2] 张立梅,唐巍,赵云军,等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5):91-96.
ZHANG Limei,TANG Wei,ZHAO Yunjun,et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control,2011,39(5):91-96.
- [3] 苏小玲,韩民晓,赵正奎,等. 配电网中分布式电源最大准入容量分析[J]. 电网技术,2012,36(10):87-92.
SU Xiaoling,HAN Minxiao,ZHAO Zhengkui,et al. Research on maximum capacity of grid-connected distributed generation in distribution network[J]. Power System Technology,2012,36(10):87-92.
- [4] 连欣乐. 基于短路电流约束的分布式电源准入容量计算的研究[D]. 长沙:湖南大学,2008.
LIAN Xinle. The research of maximum penetration capacity calculation for distributed generation basing on fault current constrains[D]. Changsha:Hunan University,2008.
- [5] 孙芊,王倩,杨利萍,等. 针对分布式光伏接入的配电网改造方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(5):60-65.
SUN Qian,WANG Qian,YANG Liping,et al. Reconstruction method of distribution network with access of distributed photovoltaic power[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2014,26(5):60-65.
- [6] 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 generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(23):54-58.
- [7] 刘渝根,米宏伟. 三相短路故障时小容量发电机出口断路器瞬态恢复电压[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):136-142.
LIU Yugen,MI Hongwei. Transient recovery voltage of circuit breaker at small-capacity generator outlet during three-phase short circuit[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):136-142.
- [8] 王守相,江兴月,王成山. 含分布式电源的配电网故障分析叠加法[J]. 电力系统自动化,2008,32(5):38-42.
WANG Shouxiang,JIANG Xingyue,WANG Chengshan. A superposition method of fault analysis for distribution systems containing distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(5):38-42.
- [9] 肖鑫鑫. 计及分布式电源的配网潮流和短路电流计算研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.
- XIAO Xinxin. Research on power flow and short circuit calculation of distribution network with distributed generations connected[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2008.
- [10] 杨杉,同向前,刘健,等. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J]. 电网技术,2015,39(7):1977-1982.
YANG Shan,TONG Xiangqian,LIU Jian,et al. Short-circuit current calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology,2015,39(7):1977-1982.
- [11] BARKER P P,DE MELLO R W. Determining the impact of distributed generation on power systems. I. radial distribution systems[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, WA,USA:IEEE,2000:1645-1656.
- [12] 杨悦,李国庆,王振浩. 基于可信性理论的含风电电力系统电压稳定概率评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):6-12.
YANG Yue,LI Guoqing,WANG Zhenhao. Probabilistic voltage stability assessment based on credibility theory for power system with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(12):6-12.
- [13] 韩柳,仇卫东,肖智宏. 电网短路电流的限制措施[J]. 电力技术经济,2009(3):33-37.
HAN Liu,QIU Weidong,XIAO Zhihong. Overview on measure of short-circuit current limitation on power system[J]. Electric Power Technology Economics,2009(3):33-37.
- [14] 杨浩. 浅析 10 kV 变配电所主要一次、二次电气设备的选择[J]. 科技传播,2011(14):145.
- [15] 陈世青. 电力变压器改造与运行维护研究[D]. 武汉:武汉大学,2004.
CHEN Shiqing. Study on the reconstruction and maintenance of power transformer[D]. Wuhan:Wuhan University,2004.
- [16] 陶时伟. 城市电网改造及优化规划的研究[D]. 重庆:重庆大学,2003.
TAO Shiwei. Study on rebuild and planning to urban power grid[D]. Chongqing:Chongqing University,2003.
- [17] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):6-13.
LI Ran,MA Huizhuo,ZHU Jinyao,et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):6-13.

作者简介:



程 超

程 超(1990—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为配电网保护及接纳分布式电源能力(E-mail:sdu_chengchao@163.com);

高厚磊(1963—),男,山东滕州人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:houleig@sdu.edu.cn);

邹贵彬(1971—),男,山东安丘人,教授,博士,主要研究方向为智能电网保护与控制(E-mail:guibinzou@sdu.edu.cn);

王娟娟(1981—),女,山东威海人,工程师,从事配电网运行管理工作。

(下转第 121 页 continued on page 121)

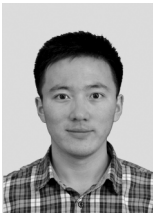
[17] FIEDLER M. Algebraic connectivity of graphs [J]. Czechoslovak Mathematical Journal, 1973, 23(2):298-305.

[18] 管宇,张晓东,徐光辉. 树的变形与代数连通度[J]. 应用数学学报, 2011, 34(2):341-352.

GUAN Yu,ZHANG Xiaodong,XU Guanghui. Deformation and algebraic connectivity of weighted trees [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2011, 34(2):341-352.

[19] ELDURSSI A M,O'CONNELL R M. A fast non-dominated sorting guided genetic algorithm for multi-objective power distribution system reconfiguration problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2):593-601.

作者简介:



王薪苹

王薪苹(1991—),男,黑龙江海伦人,硕士研究生,研究方向为电力系统优化运行与控制(E-mail:1249424131@qq.com);

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化;

孙国强(1978—),男,江苏江阴人,副教授,博士,研究方向为电力系统分析与运行控制。

Multi-objective distribution network reconfiguration considering uncertainties of distributed generation and load

WANG Xinping,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,LI Yichi,ZANG Haixiang
(College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China)

Abstract: A multi-objective distribution network reconfiguration model is built,which fully considers the uncertainties of wind power,photovoltaic generation and load,as well as simultaneously optimizes three important assessment indicators of distribution power system,i.e. power loss,nodal voltage minimum and load balancing degree. The scenario analysis method is adopted to deal with the uncertain factors and the simultaneous backward reduction method is used to reduce the scenario number. The impact of scenario number on the reconfiguration results is discussed. The MDBBO(Multi-objective Disturbance Biogeography-Based Optimization) algorithm is applied to solve the model and the fuzzy set theory is used to obtain the final reconfiguration scheme. The test results for a 69-bus distribution network show that,the proposed algorithm has higher searching efficiency to quickly find the solution of reconfiguration model and the distribution network indexes are improved by the network reconfiguration to accommodate the distributed generations.

Key words: distribution network reconfiguration; wind power; photovoltaic generation; scenario analysis method; multi-objective disturbance biogeography-based optimization algorithm; distributed power generation; uncertainty

(上接第 107 页 continued from page 107)

Primary equipment retrofitting to enhance DG accommodation capability of distribution network

CHENG Chao¹,GAO Houlei¹,ZOU Guibin¹,WANG Juanjuan²

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,Shandong University, Ji'nan 250061,China;2. State Grid Weifang Power Supply Company,Weifang 261014,China)

Abstract: With the rapid development of DG(Distributed Generation),how to evaluate and enhance the DG accommodation capability of distribution network becomes an urgent topic. A mathematical model is proposed to calculate the maximal allowable DG penetration capability of distribution network,which considers the impact of DG integration on the current tolerance ability of primary equipments and takes the short circuit current limit as the constraint. The measure against the short circuit current limit and the scheme of primary equipment retrofitting are proposed to enhance the DG accommodation capability of distribution network. Based on the structure and parameters of an actual distribution network,its power flow, short circuit current and maximal allowable DG penetration capability are calculated,a corresponding scheme of the primary equipment retrofitting is given,and its economical analysis and feasibility estimation are carried out.

Key words: distribution network; distributed power generation; DG accommodation capability; primary equipment retrofitting; check; short circuit currents