

# 分布式电源接入对配电网损耗影响分析

朱 红<sup>1,4</sup>, 韦 磊<sup>1,2</sup>, 史豪杰<sup>2</sup>, 黄 莉<sup>3</sup>, 余 昆<sup>2</sup>

(1.南京供电公司, 江苏 南京 210019; 2.河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

3.中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 4.华北电力大学, 北京 102206)

**摘 要:** 分布式电源 (Distributed Generators, DG) 对配电网损耗的影响与分布式电源的出力方式和负荷的分布关系密切。根据不同类型 DG 的发电原理, 在潮流计算中将其分别等效为 PQ、PI、PV 和 PQ (V) 型节点, 采用改进前推回代法计算含各种类型 DG 的配电网潮流, 评价不同类型 DG 在接入重负荷、轻负荷及一般负荷区域时对配电网损耗的影响。在 IEEE33 节点模型中加入 DG 进行仿真计算, 结果表明在重负荷区域接入 DG 有助于降低损耗, 对于吸收无功的 DG 需要和无功补偿装置配套安装。

**关键词:** 分布式电源; 配电网; 改进前推回代法; 有功损耗

## 0 引言

分布式发电系统接入到配电网是发展趋势<sup>[1]</sup>。大量 DG 的接入, 改变了配电网的功率分布, 从而引起网络损耗的变化, 这种变化取决于接入配电网 DG 的类型<sup>[2]</sup>及 DG 接入区域的负荷水平。

目前, 已有文献研究 DG 接入配电网对损耗的影响, 集中在潮流和损耗的计算方法上, 如在理想条件下简化配网模型以计算 DG 接入前后的损耗<sup>[3]</sup>、考虑 PQ 和 PV 型 DG 接入情况下采用改进前推回代法计算潮流和网络损耗, 分析接入 DG 前后损耗的变化<sup>[4]</sup>、采用馈线分段分析法分析光伏发电接入时损耗的变化<sup>[5]</sup>, 文献[6]则采用灵敏度法研究了不同容量及不同运行方式下 DG 接入对损耗的影响。

现有方法集中在有功和无功输出恒定的 PQ 型 DG, 对于无法等效为 PQ 模型的 DG, 如输出有功和电流恒定型 DG、有功和电压恒定型 DG 以及有功恒定、无功与输出电压相关型 DG, 对网损的影响是否与 PQ 型 DG 具有同样的规律, 需要进行研究。本文考虑不同类型 DG 的特性差异, 将其分为 PQ、PV、PI、PQ(V)四种类型<sup>[7, 8]</sup>, 利用改进前推回代法计算不同类型 DG 接入配电网的潮流, 并分别对重负荷、轻负荷和一般负荷几种情况下 DG 接入对系统网损影响的变化规律进行仿真分析。

## 1 含 DG 的配电网潮流计算

传统配电网的结构是放射状或接近于放射状, 前推回代算法包含回代和前推两个迭代过程。当

DG 接入配电网后, 原来的单电源系统变成多电源系统, 传统的前推回代法不能有效地处理 DG 并网后多种类型节点<sup>[9]</sup>。因此, 需要针对不同类型 DG 模型改进前推回代算法。

对于 PQ 恒定型分布式电源, 可以视为与功率大小相等、方向相反的负荷, 所以该类型 DG 的视在功率为  $S = -P - jQ$ , 即可以得到如下公式:

$$\tilde{E} = [(-P - jQ)/(e + jf)]^* \quad (1)$$

式中:  $e$  和  $f$  分别为分布式电源端电压的实部和虚部。

对于 PI 型节点, 其输出有功和注入电流均为恒定值, 其注入的无功大小为:

$$Q = \sqrt{|I|^2(e^2 + f^2) - P^2} \quad (2)$$

通过上式可将 PI 型 DG 转化为 PQ 节点, 即可以通过公式(1)得到其注入电流。

PQ (V) 型节点的特点是无功功率与机端电压有关, 当 DG 采用异步发电机并网运行时, 其简化等值电路图<sup>[10]</sup>如图 1 所示。

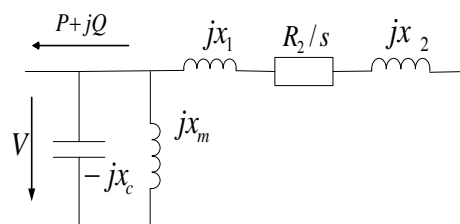


图 1 异步发电机简化等值电路图

其中,  $x_m$  为激磁电抗,  $x_1$  为定子漏抗,  $x_2$  为转子漏抗,  $x_c$  为机端并联电容器电抗,  $R_2$  为转子电阻,  $s$  为转差, 定子电阻忽略。

根据图 1 可以推出异步风力发电机吸收的  $Q$  与  $V$  的函数关系式:

$$Q = -\frac{V^2}{x_F} + \frac{-V^2 + \sqrt{V^4 - 4P^2x^2}}{2x} \quad (3)$$

$$\text{式中, } x = x_1 + x_2; \quad x_p = \frac{x_c x_m}{x_c - x_m}。$$

一般来说, 采用有励磁调节能力的同步发电机作为接口的 DG 具有两种励磁控制方式, 即电压控制和功率因数控制<sup>[1]</sup>。采用电压控制的 DG 在潮流计算中可作为 PV 节点处理, 采用功率因数控制的 DG 可作为 PQ 节点处理。对于采用无励磁调节的同步发电机作为接口的 DG, 则需要在潮流计算中进行特殊处理。考虑隐极机, 有下式成立:

$$P_{DG} = \frac{E_{DGq}V}{X_d} \sin \delta \quad (4)$$

$$Q_{DG} = \frac{E_{DGq}V}{X_d} \cos \delta - \frac{V^2}{X_d} \quad (5)$$

式中:  $P_{DG}$ ,  $Q_{DG}$  分别为 DG 的有功输出和无功输出;  $E_{DGq}$  为 DG 机组的空载电势, 由于无励磁调节系统, 所以  $E_{DGq}$  为常数;  $X_d$  为 DG 机组的同步电抗;  $V$  为机端电压;  $\delta$  为功角。

一般在潮流计算中可认为 DG 的输出有功已知, 根据式 (4) 和式 (5) 可以推得  $Q_{DG}$  与端电压的关系:

$$Q_{DG} = \sqrt{\left(\frac{E_{DGq}V}{X_d}\right)^2 - P_{DG}^2} - \frac{V^2}{X_d} \quad (6)$$

式 (6) 与式 (3) 有类似之处, 不同的是式 (3) 中的  $Q$  小于 0, 表明异步发电机实际上是吸收无功,

而式 (6) 中的  $Q$  大于 0。

处理 PQ (V) 节点时, 潮流计算每次迭代后都会对电压进行修正, 并根据修正后的电压幅值计算出 DG 的无功功率。因此, 第一次迭代时, 通过公式 (3) 和 (6), 可把 PQ (V) 节点暂时转换成传统潮流算法能处理的 PQ 节点, 再利用公式 (1) 将 PQ (V) 型的分布式电源模拟成注入电流, 进行潮流计算。第二次迭代时, 根据修正后的电压计算无功功率, 此时又转换为 PQ 节点, 重复以上过程直至迭代收敛。

在处理 PV 节点时, 为了保证 PV 节点迭代电压幅值不变和 PV 节点的有功功率不变, 需要增加一个电压源向 PV 节点注入一定电流, 以此来使得 PV 节点的电压幅值等于设定的电压幅值  $V'_{PV}$ 。增加的电压源为:

$$\Delta \dot{V}_{PV} = V'_{PV} - \dot{V}_{PV} \quad (7)$$

通过对  $\Delta \dot{V}_{PV}$  的判定来决定是否对 PV 节点通过注入无功电流进行补偿。若  $|\Delta \dot{V}_{PV}| < \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为收敛精度), 那么 PV 节点的电压将收敛于设定的电压幅值  $V'_{PV}$ ; 若  $|\Delta \dot{V}_{PV}| \geq \varepsilon$ , 则需要对 PV 节点注入一定的电流使得 PV 节点收敛于设定的电压值, PV 节点注入补偿电流  $\Delta \dot{I}_{PV}$  的计算公式如下:

$$\Delta \dot{I}_{PV} = Z_{ii}^{-1} \times \Delta \dot{V}_{PV} \quad (8)$$

式中, 为 PV 节点注入补偿电流相量;  $Z_{ii}$  为 PV 节点的自阻抗; 当有多个 PV 节点时为端口的入端阻抗矩阵, 其对角线上元素为 PV 节点的自阻抗 (即 PV 节点到根节点所有阻抗之和), 非对角线上元素为 PV 节点之间的互阻抗 (即 PV 节点 i 与 PV 节点 j 到根节点的公共路径上所有阻抗之和)。

PV 节点的无功功率越界问题可采用传统方式处理, 即在迭代过程中, 若经过修正后的 PV 节点无功越限, 则将其转化成无功为上限或者下限的 PQ 节点。

## 2 算例分析

采用本文前述的改进前推回代潮流计算方法, 利用 Matlab 对 IEEE33 节点系统进行仿真分析, 接线如图 2 所示。

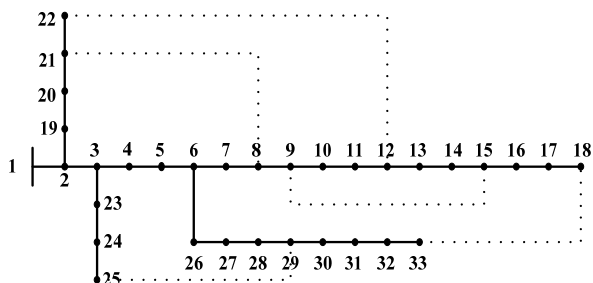


图 2 IEEE33 节点系统

不同类型 DG 在接入重负荷、轻负荷以及一般负荷区域时, 对系统网损影响的变化规律具有差异, 因此在图 2 所示配电网中分别进行仿真和对比分析。基准功率取 1MVA, 电压基值取 10kV, 则母线电压为 1.02, 收敛精度要求:  $\varepsilon < 10^{-6}$ 。其中, 各种分布式电源的数据信息如表 1 所示。

表 1 分布式电源的数据信息

DG 类型	相关参数
PQ 型	$P=0.424\text{MW}, Q=0.220\text{Mvar}$
PI 型	$P=0.424\text{MW}, I=0.030\text{kA}$
PQ(V)型	$P=0.424\text{MW}, E_{DG}=11.07\text{kV}$ $x_d=1.7\Omega, x_p=38.6\Omega, x=1.68\Omega$
PV 型	$P=0.424\text{MW}, V=10\text{kV}$

假定图 1 所示的 IEEE33 节点系统中, 11~18 号节点分别接入重负荷、一般负荷和轻负荷, 在三种负荷水平情况下, 分别将各类型 DG 接入 17 号节点, 计算接入 DG 前后的系统有功损耗。仿真结果如表 2 所示。

表 2 DG 接入前后的系统有功损耗 (单位为标么值)

DG 类型	重负荷	一般负荷	轻负荷
无 DG	1.3463	0.5176	0.2916
PQ 型	1.1848	0.4435	0.2490
PV 型	1.2187	0.4590	0.2578
PQ (V) 型 (吸收无功)	4.5879	3.5633	3.3132
PQ (V) 型 (发出无功)	0.8948	0.4024	0.2597
PI 型	1.1485	0.4244	0.2385

表 3 DG 接入后系统有功损耗减小量 (单位为标么值)

DG 类型	重负荷	一般负荷	轻负荷
PQ 型	0.1615	0.0741	0.0462
PV 型	0.1276	0.0586	0.0338
PQ (V) 型 (吸收无功)	-3.2416	-3.0457	-3.0216
PQ (V) 型 (发出无功)	0.4515	0.1152	0.0319
PI 型	0.1978	0.0932	0.0531

除吸收无功的 PQ (V) 型 DG, 其它类型 DG 的接入均降低了配电网损耗, 与未接入 DG 相比, 损耗的降低程度如表 3 所示, 负值表示接入 DG 后损耗增加。

仿真结果表明, DG 接入配电网对损耗的影响与 DG 的类型及接入区域的负荷水平密切相关。对于 PQ、PV、PI 和发出无功的 PQ (V) 型 DG, 无论其接入点附近的负荷水平如何, 都可以降低系统损耗。但损耗的降低程度与接入点附近的负荷水平有关, 接入区域为重负荷时损耗降低最多, 其次是接入一般负荷区域, 降损较少的是接入轻负荷区域。因此, 对于 PQ、PV、PI 和发出无功的 PQ (V) 型 DG, 应尽量接入重负荷区域, 充分利用 DG 发出的功率, 降低网络损耗。对于吸收无功的 PQ (V) 型 DG, 应装设充足的无功补偿设备, 否则该类型 DG 的接入将增加系统的损耗。

### 3 结论

由于 DG 类型众多, 因此在研究 DG 的接入对系统损耗的影响时, 需要针对不同类型 DG 分别进行分析。本文通过对四种类型的 DG 在接入重负荷、轻负荷以及一般负荷区域时, 系统损耗的变化情况进行仿真, 全面分析、总结了各种类型 DG 接入对配电网损耗的影响规律。有关 DG 接入对系统损耗影响的分析结论可作为实际分布式发电接入决策时的参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 李兴源, 李蓓. 分布式发电及其对配电网的影响[J]. 国际电力, 2005, 9(3): 45-49.
- [2] Quezada Víctor H. Méndez, Abbad Juan Rivier, Román Tomás Gómez San. Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2006, 21(2):533-540.
- [3] 刘琳, 陶顺, 肖湘宁, 等. 分布式发电及其对配电网网损的影响分析[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(3): 16-24.
- [4] 刘鹏, 马明, 张俊芳. 分布式电源对配网网损影响的研究[J]. 现代电力, 2008, 25(6): 27-30.
- [5] Hoff T., Shugar D. S. The Value of Grid-support Photovoltaics in Reducing Distribution System Losses[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995,

- 10(3):569-576.
- [6] Ayres Hugo M., Silva Luiz C. P. Da, Freitas Walimir. Evaluation of the Impact of Distributed Generation on Power Losses by Using a Sensitivity-Based Method[C]. Power & Energy Society General Meeting, 2009:1-6.
- [7] 闫丽梅, 谢明霞, 徐建军, 等. 含分布式电源的配电网潮流改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 17-22.
- [8] 陈海众, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40.
- [9] 吕学勤, 吴辰宁. 含分布式电源的配电网潮流计算改进方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 48-51.
- [10] Feijdo Andr S. E., Cidris Jose. Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2000, 15(1):110-115.
- [11] Freitas Walimir, Vieira Jose C. M., Morelato Andre. Influence of Excitation System Control Modes on the Allowable Penetration Level of Distributed Synchronous Generators[J]. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2005, 20(2):474-480.
- [12] Chiradeja Pathomthat, Ramakumar R. An Approach to

Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation[J]. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2004, 19(4):764-773.

---

作者简介:

朱 红 (1971-), 女, 江苏南京人, 高级工程师, 主要研究方向为电网运行、调度自动化、智能电网, 分布式能源;

韦 磊 (1982-), 男, 江苏南京人, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化, 电力系统信息通信;

黄 莉 (1985-), 女, 江苏南京人, 工程师, 硕士, 研究方向为智能用电、需求侧管理, 分布式电源与微电网;

史豪杰 (1989-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网经济运行分析;

余 昆 (1978-), 男, 江苏南京人, 博士, 副教授, 研究方向为智能配电网运行分析与控制、配用电自动化及其高级应用、能效与节能。