

文章编号: 1006-4729(2012)04-0321-04

分布式电源并网的潮流计算

吕学勤, 吴辰宁, 陈树果

(上海电力学院 电力与自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 介绍了分布式电源在潮流计算中的数学模型及传统配电网的特征, 论述了目前应用最广的一些含分布式电源配电网的潮流算法及其优缺点, 最后指出了分布式电源潮流计算的发展趋势。

关键词: 分布式电源; 并网; 建模; 潮流计算

中图分类号: TM711; TM744 **文献标志码:** A

Research on Distributed Generation and Grid-connected

LV Xue-qin, WU Chen-ning, CHEN Shu-guo

(School of Electric Power and Automation Engineering, Shanghai
University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The math model of distribution generations in power flow calculation is studied based on different type. Then the characteristics of classic distributed grid are introduced. Some power flow algorithms with DGs that are applied widely at present are expounded in details. The advantages and shortcomings of each algorithm are put forward. Finally, the trend of power flow calculation with DGs is summerized.

Key words: distributed generation; grid-connected; modeling; power flow calculation

随着世界能源短缺、气候变化, 以及环境污染等问题日益严峻, 清洁能源的应用将会越来越广泛。近年来, 我国可再生能源的利用每年以超过25%的增速发展。到2020年, 新增分布式电源容量在能源供应结构中的比重有望由7%提高到15%, 可再生能源发电装机容量在总装机容量中的比重有望达到30%以上, 其中水电达到 2.9×10^9 kW, 风电达到 3.0×10^7 kW, 太阳能光伏发电达到 2.0×10^6 kW^[1]。

分布式发电(Distributed Generation, DG)是指小规模(功率在几千瓦至几十兆瓦)、分散布置在

负荷附近、可独立地输出电能的系统。由于全球电力工业出现由集中供电模式向集中和分散相结合的供电模式过渡的趋势, 因此DG必将成为新世纪电力产业的重要发展方向之一^[2,3]。分布式电源的发电功率较小, 大部分都被接入配电网或直接与用户相连, 可以用来调节峰谷平衡。而在配电网中加入分布式电源, 使传统配电网的单电源结构变为多电源结构, 对配电网的网络重构、电压分布、继电保护等方面都将造成很大的影响。而配电网的网络重构、故障处理、无功优化、状态估计等都需要用到潮流计算的数据, 因此建立带有分布

收稿日期: 2011-05-30

通讯作者简介: 吕学勤(1974-), 女, 博士, 山东济南人。主要研究方向为机器人自动控制。E-mail: lvxueqin@shiep.edu.cn.

基金项目: 上海市教育委员会重点学科建设项目(J51301)。

式电源的配网潮流计算的模型并进行仿真计算,将为分布式电源接入配网的研究,包括分布式电源的规划、优化配置、投资,以及保护整定等提供依据和参考^[4,5]。

1 潮流计算中分布式电源数学模型

包含 DG 的配电网潮流计算与普通潮流计算的区别之一是 DG 的潮流计算模型与传统发电机组计算模型不一致。分布式发电大体上可分为微型燃气轮机、风力发电、燃料电池,以及光伏电池。文献[6]讨论了 DG 与电网互联的几种常见接口形式,并分别建立了这些接口在潮流计算中的数学模型,提出了基于灵敏度补偿的配电网潮流计算方法。其将 DG 并网接口分为同步发电机、异步发电机和电力电子变换器接口 3 大类,这也成为了其后研究 DG 并网问题的基本模型,见表 1。

表 1 DG 的容量及其与电网的接口

发电形式	典型容量范围/W	与电网的常见接口
太阳能光伏	$1.0 \sim 1.0 \times 10^5$	DC/AC 变换器
风能	$100 \sim 1.0 \times 10^5$	异步发电机
微型燃气轮机	$1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$	AC/AC 变换器
燃料电池	$1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$	DC/AC 变换器

在 DG 接入电网的系统中,需要对各种接入电源进行分析,并确定其在系统中的模型,即节点类型。

光伏发电多采用单位功率因数并网,其并网的电流和电压同频同相。其输出的有功和注入配电网的电流是恒定的,而注入的无功为:

$$Q = \sqrt{|I|^2(e^2 + f^2) - P^2} \quad (1)$$

式中: I ——注入电网的恒定电流;

P ——输出的恒定有功;

e, f ——DG 并网处电压的实部和虚部。

在潮流计算中,设其节点类型为 PI 节点,根据每次迭代得到的电压的实部和虚部由式(1)计算出其注入的无功,然后在下次迭代时,将其转换成 PQ 节点。

燃料电池输出的电流为直流,与配电网连接时需要通过逆变器控制并将电流转化为交流,因此在计算燃料电池的潮流时可以将其当成 PV 节点来处理。但由于逆变器无功输出有上限,因此当处理过程中出现无功越限时,可以将其转化为 PQ 节点来处理。

风力发电机组的潮流计算需要具体问题具体

分析。按照风力发电机的类型可将其分为普通异步风机、双馈感应风机和多级同步风机 3 大类,但不能将这些风机看作是一种节点。

传统发电机节点在潮流计算中一般固定取为 PQ 节点、PV 节点,以及平衡节点。而 DG 由于其运行方式的特殊性及其控制特性的不确定性,其节点类型的选取还需要根据实际情况而定。节点选取的本质是在迭代步将各类节点转换成为传统方法能够处理的 PQ 节点或 PV 节点。

文献[7]分别介绍了通过异步机、同步机直接接入,以及通过电力电子装置接入 3 种 DG 并网方式,并详细讨论了单轴、分轴微型燃气轮机和异步、双馈风机的数学模型及其在潮流计算中的节点类型。

文献[8]针对目前应用较为广泛的光伏发电进行了详细讨论,并提出在不计内部参数的前提下,可在潮流计算中将其当作 PQ 节点。此外,还作出了 MPPT 和逆变器的模型。

分布式电源的种类繁多,功率较小,稳态特性差等特点,目前对其数学模型的研究有很大局限性。有部分研究者提出利用概率模型来描述分布式电源,但其理论较复杂,且现有的文献较少,这将是分布式电源建模的发展方向。

2 含分布式电源配网潮流计算方法

2.1 传统潮流算法

传统的低压配电网结构如图 1 所示。

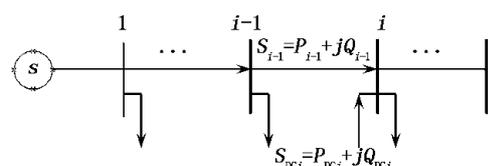


图 1 配电网结构

传统的低压配电网结构具有以下 4 个特征:一是在正常运行情况下,配电网一般呈辐射状结构,但是在遇到故障处理进行倒负荷操作或网络重构时,可能会出现短时间的环网运行,但这种运行方式与输电网络中的环网运行有所不同,由于环的数量较少,因而称为弱环;二是线路 R/X 值较高,多数情况大于 1;三是 3 相负荷不对称问题比较严重;四是网络中基本上都是 PQ 节点。

传统配电网的算法通常有前推回代法、Zbus

高斯法、直接法、改进牛顿法等,这些算法各有优缺点^[9],且主要解决 R/X 值较高和负荷不对称问题。

2.2 含 DG 的配网潮流算法

含分布式电源的配电网结构如图 2 所示。

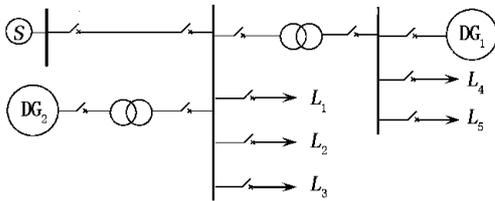


图 2 典型含 DG 配电网

加入分布式电源后,传统配网中大量的 PQ 节点将减少,弱环网和潮流双向流动的情况将会增多,再加上新兴的微网等,都会给潮流计算带来很大困难。

目前,针对 DG 并网的潮流计算主要采用的是改进的前推回代法^[10-12]。传统配电网中不含 PV 节点,因此前推回代法可以很好地解决潮流分布的计算。但由于引进了分布式电源后,各个并入电网中的小型电源不能只被看作是 PQ 节点,也可能是 PV 节点,或是 PQ(V) 节点等^[13]。由于传统前推回代法无法处理环网及 PV 节点,所以研究者提出了改进的前推回代法。在此基础上还推出了改进的节点编号法,以及戴维南等值阻抗矩阵法、注入无功补偿法等。

文献[14]对带有分布式电源的节点进行了重新分类,即分为: P 恒定、 U 恒定的 PV 节点; P 恒定、电流幅值 I 恒定的 PI 节点; P 恒定、 U 不定、 Q 受 P 和 U 限定的 PQ(V) 节点,这为分析 DG 并网提供了一种新的思路。文献[15]针对辐射型配电网,应用前推回代法求解潮流,在潮流计算中将分布式发电作为 PQ 或 PV 节点。但对于弱环网系统,由于系统收敛性较差,考虑到负荷分布和分布式发电的容量分配,文献[16]引入了基于参与因子调整的分布式松弛母线模型,应用 N-R 法求取基于网损灵敏度的参与因子,通过参与因子计算变电站和各个分布式发电参与有功网损分配的贡献,从而形成含分布式发电的配电网潮流计算方法。文献[17]使用快速直接算法,利用层次矩阵快速实现矩阵形式的前推回代,并证明计算效率有了较大幅度的提高,但对于 PV 节点,仍然没

有很好的收敛速度。

由于分布式电源可能单相接入,也可能 3 相接入电网,这将导致较严重的不平衡电流。因此,对于实际配电网,还需要注意 3 相不平衡度。文献[18]提出电机控制的概念,利用分布式松弛母线模型来解决 DG 接入配电网后产生的 3 相不平衡潮流。文献[19]在计及配电网 3 相参数不平衡的同时,针对环网问题进行了研究,同样使用改进的前推回代法。文献[20]将所有分布式电源分为“簇”,然后利用 3 相潮流算法,来解决大规模分布式电源并网问题,但其将 DG“簇”设为 PV 或 PQ 节点,显然是不够的。目前对于分布式并网的潮流计算还包括连续潮流算法^[21],改进节点关联矩阵自乘^[22],分布式最优潮流算法^[23]等。

文献[24]针对分布式电源潮流的动态随机性,提出通过确定的变化规律与随机变量叠加来建立其概率模型,采用 Gram-Charlier 级数近似法计算其概率密度函数,可以同时计及规律性变化和随机变化。文献[25]建立了风力发电和太阳能发电的随机分析模型,采用基于半不变量法的随机潮流的方法得到了节点电压概率密度曲线,较好地解决了风电和太阳能发电并网的潮流双向流动问题。文献[17]使用快速直接算法,通过节支关联矩阵,得到用层次矩阵快速实现矩阵形式的电流型前推回代,并证明计算效率有很大提高,但对于 PV 节点,仍然没有很好的收敛速度。文献[26]将网络支路按层次进行分类,利用前推回代法分层并行计算各层的支路功率损耗和电压损耗。文献[27]提出了基于连续潮流的分布式电源并网计算,为了解决含分布式电源之后有可能出现的电压崩溃问题,提出了使用鞍节点这一概念。概率潮流算法使用概率密度函数作为基本数学理论,鉴于变量的随机性和方程的非线性,其计算量将很大,求解也较困难。但此算法最能体现出分布式电源的特点,只要根据实际情况,适当简化计算过程,就可以较好地解决分布式电源由于天气、温度等因素带来的不确定性问题。

综上所述,虽然目前关于 DG 并网的潮流算法较多,但均未能指出如何协调可能出现的散户并网问题。由于散户并网的随机性非常大,因此其节点判断及潮流分析比较困难。此外,这些算法都只是在已经使用了几十年的算法上进行的改进,最近几年新兴的配电网算法并没有应用到分布式

并网这一领域的研究中。

3 结 语

根据分布式发电的特点,其潮流计算的研究方向主要集中在以下两方面。一是建立更精确的分布式电源模型。由于目前分布式电源的模型研究主要是在集中型大规模的风电光伏上,暂时还没有对以用户为单位的小型分散电源并网模型进行研究,因此需建立更精确的电源模型。二是改进现有的潮流算法。潮流计算是电力系统分析的基础,对于一个新出现的系统,必须在考虑新元件、新问题的前提下,改进传统的电力系统潮流算法,以得到适用于新系统的潮流算法,使之能准确、方便地为新系统的分析所运用。但随着分布式电源越来越多,潮流计算需要更为准确,这就需要根据具体情况,寻找更适合实际运行特点的潮流算法。

参考文献:

- [1] 秦立军,马其燕. 智能配电网及其关键技术[M]. 北京: 中国电力出版社,2010: 12-44.
- [2] 帅军庆. 特大型电网高级调度中心关键技术[M]. 北京: 中国电力出版社,2010: 462-516.
- [3] World Alliance of Decentralized Energy. World survey of decentralized energy 2004 [R]. World Alliance of Decentralized Energy 2004: 16-23.
- [4] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术,2003,27(12): 71-76.
- [5] 王建,李兴源,邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化,2005,29(24): 90-97.
- [6] 陈海焱,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.
- [7] 彭彬,刘宁,吴迪. 配电网潮流计算中的分布式电源建模[J]. 电力系统及其自动化学报,2011,23(4): 152-156.
- [8] 刘东冉,陈树勇,马敏,等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术,2011,35(8): 47-51.
- [9] 郭学凤. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[D]. 安徽: 合肥工业大学,2009.
- [10] 张立梅,唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报,2010,25(8): 123-129.
- [11] 李丹,陈皓勇. 分布式电源混合并网的配电网潮流算法研究[J]. 华东电力,2011,39(1): 76-79.
- [12] 李新,彭怡,赵晶晶,等. 分布式电源并网的潮流计算[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(17): 78-81.
- [13] 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.
- [14] 王守相,黄丽娟,王成山,等. 分布式发电系统的不平衡三相潮流计算[J]. 电力自动化设备,2007,27(8): 11-14.
- [15] ZHU Y, TOMSOVIC K. Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 822-827.
- [16] 杨旭英,段建东,杨文字,等. 含分布式发电的配电网潮流计算[J]. 电网技术,2009,33(18): 139-142.
- [17] 王建勋,吕群芳,刘会金,等. 含分布式电源的配电网潮流快速直接算法[J]. 电力自动化设备,2011,31(2): 17-21.
- [18] TONG Shi-qiong, KAREN Nan Miu. A network-based distributed slack bus model for DGs in unbalanced power flow studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 835-842.
- [19] 丁明,郭学凤. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2009,29(13): 35-40.
- [20] SARIKA Khushalani, JIGNESH M Solanki, NOEL N Schulz. Development of three-phase unbalanced power flow using PV and PQ models for distributed generation and study of the impact of DG models [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1 019-1 025.
- [21] TENG Jen-hao. A direct approach for distribution system load flow solutions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 882-887.
- [22] 唐小波,徐青山,唐国庆. 含分布式电源的配网潮流算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(5): 34-36.
- [23] LIN Ch'i-hsin, LIN Shin-yue. Distributed optimal power flow with discrete control variables of large distributed power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1 383-1 392.
- [24] 余昆,曹一家,陈星莺,等. 含分布式电源的地区电网动态概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1): 20-24.
- [25] 王成山,郑海峰,谢莹华,等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化,2005,29(24): 39-45.
- [26] 颜伟,刘方,王官洁,等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(8): 76-80.
- [27] HASAN Hedayati, Nabaviniaki S A, AKBARIMAJD Adel. A method for placement of DG units in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1 620-1 627.

(编辑 苏娟)