

毕业论文

设计题目:	含分布式电源的配电网潮流计
	算

毕业论文

含分布式电源的配电网潮流计算



摘 要

在分布式电源系统当中，主要是它和大电网的供电系统起到了一个相互补充和协调的作用，主要是利用了现有的综合设备以及资源，从而可以给用户提供一个更为良好的并且可靠的电能应用方式。

因为分布式电源通过了并网以后，它对于在各个地区的电网运行和在其结构当中都发生很大的变化，有一定的影响，所以，分布式的电源潮流计算就能起到了一定的作用，这也是作为评估的重要方式之一，作为优化电网运行重要的理论基础，通过长期的研究证明，技术已经较为成熟，有利于电网长足的发展。

现在，新能源开发利用的分布式发电技术已经成为了电力工业一个新的研究热点。目前，国内外在研究基于分布式电源的潮流计算方法主要围绕在牛顿拉夫逊法（newton-raphson method NR）、前推回代法、高斯 Zbus 3 种方法。在配电网潮流计算方面，本文分局接口的模型的不同将 DG 分为 PQ, PV, PI 和 PQ(V) 等四种节点类型，并为每种节点类型 DG 建立了潮流计算模型。在传统潮流计算方法的基础上，结合各点类型 DG 的潮流计算模型，提出了适用于含不同类型 DG 的配电网潮流计算方法，并以 IEEE33 算例验证了算法的可行性。

关键词：配电网，分布式电源，潮流计算



ABSTRACT

In the distributed power system, mainly it and large power grid power supply system play a mutual supplement and coordination role, mainly is the use of existing integrated energy and resources, and can provide users with a more good and reliable electricity can be

Because of the distributed power supply through the grid after it for power grid structure in various regions and in the structure have taken place great changes, certain intelligent distributed power flow calculation will be able to play a certain role, it is also one of the important ways to evaluate the, as an important theoretical basis for power grid operation optimization, through long-term research proof, technology has been more mature is conducive to the rapid development of the grid.

Now, new energy development and utilization of distributed generation technology has become a new research focus in the power industry. At present, research at home and abroad based on distributed power flow calculation method mainly focus on Newton Raphson (Newton-Raphson, NR), forward and backward substitution method, ZBUS Gauss 3 kinds of methods. In terms of power flow calculation, this paper divides DG into PQ, PV (V) and other four kinds of node types, and establishes the power flow calculation model for each node type. In the traditional power flow calculation method based on, combined with the trend of the type of DG calculation model, is proposed, which can be used with different types of DG distribution network power flow calculation method, and the IEEE 33 example is used to verify the feasibility of the algorithm.

Keywords: Distribution Network, Distributed Power Supply, Power Flow Calculation



目 录

摘 要.....	
ABSTRACT	
目 录.....	
第一章 绪论.....	
1.1选题背景及意义	
1.2 含分布式电源的配电网研究的现状	
1.2.1 分布式电源的发展及应用概况	
1.2.2 分布式电源的潮流算法研究现状	
1.3 本文主要工作	
第二章 分布式电源的建模.....	
2.1 太阳能光伏发电	
2.1.1光伏发电的工作原理	
2.1.2 光伏发电的模型	
2.2 燃料电池	
2.2.1燃料电池的工作原理	
2.2.2燃料电池的模型	
2.3 风力发电	
2.3.1风力发电的工作原理	
2.3.2风力发电的模型	
第三章 配电网潮流计算.....	
3.1 配电网潮流计算的概述	
3.1.1配电网潮流计算的基本要求	
3.2基于回路分析法的配电网潮流计算	
3.2.1回路分析法基础	
3.3基于回路分析法的潮流直接算法	
第四章 含分布式电源的配电网潮流计算.....	
4.1分布式电源的模拟	
4.1.1 PQ恒定型分布式电源	
4.1.2 P恒定型分布式电源.....	
4.1.3 PQ(V)分布式电源	



4.1.4 PV恒定型分布式电源	
4.1.5 分布式电源的处理方法	
4.2 含 DG 的潮流计算方法	
4.2.1 配电网拓扑结构的矩阵描述	
4.2.2 潮流算法的实现	
4.2.3 潮流算法的流程	
4.2.4 含 DG 配电网潮流计算方法的实现	
4.3 算例分析	
结 论	
参考文献	
附录	
致 谢	



第一章 绪论

1.1 选题背景及意义

随着负荷的快速增长以及电力市场的逐步推行,传统的集中式发电已经不能满足当今社会对电力及能源供应的需求。近些年来,集中式发电受到它自身缺陷的限制,对电力供应的稳定和安全带来了不可忽视的影响。为了解决这类问题,我们找到了一种可靠、灵活、高效、经济的发电方式,即分布式发电技术。分布式发电与集中式发电相结合将是 21 世纪电力工业的优先发展方向。其不但可以解决集中式发电投资大、建设周期长、调节不灵活及事故范围大等弊端,还能使得日益枯竭的能源危机和环境污染得到了较大的改善。

分布式发电技术通常是指发电功率在数千瓦至数百兆瓦的小型模块化且分散布置在用户附近的高效、可靠、清洁、可持续发展的发电技术[1]。分布式电源(Distributed Generators, DGs)主要包括微型燃气轮机(Micro-turbines)、燃料电池(Fuel Cell)、光伏发电和风力发电等一些新能源领域。按发电能源是否可再生,可将其分布式发电分为两类:一类是用不可再生能源的分布式发电,主要是采用化石燃料作为能源;另一类是用可再生能源的分布式发电,它不会造成污染,属于绿色电力。比如:风能、太阳能都是取之不尽用之不竭的自然资源,其他分布式发电装置使用的大多数如:天然气、沼气、生物质能等清洁燃料,而传统发电燃料主要是以煤为主;这些装置还应用了现代污染物控制技术,从而控制废水、废渣等的排放量。此外,分布式电源的开发、研究和建设,还有如下重要的意义:

(1) 因为城市的大规模发展,使得新的配电线路走廊开辟越来越困难,而直接在用户旁安装分布式电源是一种很有效的替代方案。

(2) 对于偏远地区,可以依靠当地丰富的自然资源,从而选择合理的分布式发电方式能够有效的节约筹建投资大的电网。分布式电源设备,无论是燃气轮机还是内燃机,都可以供电、供热(冷)服务,能够解决边远山区、矿区、旅游区的用电问题。

(3) 随着电力市场的逐步推行,用户对供电可靠性、电能质量以及电价的关注日益增加,而采用分布式发电则有利于降低用户电价,提高电能的质量和供电的可靠性,同时满足用户多方面的要求,为用户用电提供更多的选择。

(4) 分布式电源已经成为了一种以电网最大经济为目的调频、调峰的手段,不但可以利用储能设备的储电能力实现补峰填谷和调频,还还可以利用它来控制电网高峰和低谷时的发电功率(除可再生能源外)。

(5) 随着经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,从而促进了电力负荷的快



速增长，导致了某些地方出现了比较严重的电力缺口。如果采用集中式发电来平稳渡过这一时期是不可能的，但分布式电源具有投资小、建设周期短等优点就可以满足电力负荷增长后的要求。

(6) 伴随新型发电技术和新型储能技术的发展，分布式电源（除可再生能源外）采用热效率在 65%-95% 的设备，增加了能源利用率，从而减少了对一次能源的消耗。

因为分布式电源的引入，从而电源的节点类型出现了 PQ、PI、PV、PQ(V) 节点。另外，因为系统中还有 PV 节点及少量环网的存在，使得基于传统的辐射状网络的前推回代算法已经不再适用。

含分布式电源的配电网潮流计算的功能是计算线路中的功率和电压，但有时也用来评估其并网后对配电系统所产生的影响，而且是分析分布式电源对电网静态稳定性影响等其他理论研究工作的基础，因而研究含分布式电源的配电网潮流计算具有一定的理论意义和实用价值。

1.2 含分布式电源的配电网研究的现状

1.2.1 分布式电源的发展及应用概况

分布式发电方式的发展主要经历了以下三个阶段。

(1) 早期的电力系统是采用分布式发电方式，在负荷附近建立小型容量发电厂，为用户提供小规模电源。这主要是因为当时技术不发达，用电量低；

(2) 20 世纪初，随着技术的进步和负荷的增加，大机组、大电网、高电压为主要特征的集中式单一供电系统成为了主流的发电方式。它的大容量、巨型化发电能够满足当时社会的发展和用户的需要。但是，由于近年来屡屡发生的电力危机和大面积停电事故，从而让我们深深地意识到庞大的电力系统存在既“笨拙”又“脆弱”的缺点。

(3) 到了 20 世纪中晚期，由于用电需求的大量增加，人们愈加了解灵活、可靠的发电方式的重要性，于是分布式与集中式相结合，不但能够克服集中式单一供电的缺点，而且还能够满足日益增长的能源需求和解决环境污染问题。自从上个世纪 90 年代以来，可再生能源已经得到了快速发展，世界上有很多国家都将可再生能源作为能源政策的基础，且分布式能源的发展被世界认为是可持续发展的标尺。而在美国，分布式发电的输出功率在 20kW 到 10MW 之间的市场已达 11 亿美元。在美国加利福尼亚州的分布式电站发电量已经达到 4GW-5GW，并且在 2010 年将 20% 的新建办公、商用建筑都使用“热电冷三联产系统功能模式”，对 5% 的现有办公、商用建筑进行适当的改造。印度则在 2012 年可再生能源发电比例将要超过 10%。欧盟各国以可再生能源为主体的分布式发



电的发展更受到瞩目。丹麦将资源消耗、经济发展和环境保护这三方面进行了有机结合，在世界上成为可持续发展国家中的典范。现在，丹麦已经投建了 15 家大型生物直燃发电厂，提供全国约 5% 的电力供应，且年消耗农林废弃物近 150 万吨。近些年来，德国利用风能、太阳能、沼气、地热、水利等可再生能源发电、供热共 2000 亿 kWh，占据能源供应市场份额的 7.7%，能够满足约 1000 万家庭的日常供电需要。日本不但是亚洲能源利用率最高的国家，而且在全世界也位居前列。日本的分布式发电是以热电联产和太阳能光伏发电为主，总装机容量约为 3600 万 kW，占全国发电总装机容量 13.4%。据相关资料显示，日本在 2009 年全球天然气贸易中所占比例大约为 35%，成为了全球第二大液化天然气消费国。在美国、欧洲的一些国家，虽然他们的工业发达，用电负荷大，分布式电源的发展要比中国要早一些，但发展也还在初始阶段。

近年来我国政府高度重视可再生能源的利用和开发，将“能源总量控制”的重点集中在煤炭总量的控制上，并纳入“十二五”能源规划，这标志着分布式发电在我国将达到一座新的里程碑。经过多年的发展，我国可再生能源的开发利用已取得了很大进展。从风电资源开发来看，2003 年底，全国并网风力发电装机容量为 56.9 万千瓦，风电装机容量位居世界第 10 位，已经基本掌握单机容量 750 千瓦以下大型风力发电设备的制造能力，正在开发兆瓦级的大型风力发电设备。从太阳能技术发展来看，到 2003 年底，全国太阳能热水器使用量达到 5000 万平方米，占全球使用量的 40% 以上。太阳能热水器生产量达 1000 万平方米，全真空玻璃管热水器在世界市场上占据主导地位。从沼气利用来看，我国的沼气技术开发始于上世纪 50 年代，70 和 80 年代得到大规模发展，主要用于满足农村居民生活用能。全国有户用沼气池 1000 多万口，年产沼气约 30 亿立方米。已建成大中型沼气工程 1900 多处，年产沼气约 12 亿立方米。尽管我国可再生能源产业发展取得了很大进展，但与发达国家相比还有很大的差距，还远远不能适应我国能源发展战略的要求。可再生能源发展缓慢客观上是风力发电、太阳能发电的成本难以与化石能源去竞争，但从国外的经验来看，关键是促进可再生能源发展的政策力度不够所致。发展可再生能源利在社会，意在长远，可再生能源很难与常规能源在市场上竞争，因此必须通过辅以特殊的能源政策，反映国家的意志，促进可再生能源的发展。如今我国正在经济高速发展的时期，如何在合理的开发利用可再生能源和新能源提高能源的利用率，同时加强环境保护等是我国能源工业实现健康可持续发展、支持国家现代化建设的关键所在。

1.2.2 分布式电源的潮流算法研究现状

分布式发电作为国际上电力系统的一个前沿研究方向，对其研究的重点集中在其对



电力系统的影响上。含分布式电源的配电网潮流计算方法的研究主要是对不同类型的分布式电源建立模型，使之能够模拟到已有的计算方法中去。它的未来研究趋势是：使得算法能够处理含不同的分布式电源在不同运行状态中同时运行的系统，计算过程更高效、通用性更好。在近年国内外的相关文献中，研究主要的问题有：

(1) 分布式电源模型的建立。因为分布式电源的潮流计算模型和传统发电机组计算模型不同，使得传统的潮流计算方法不能够适用于含分布式电源的配电网。传统的发电机节点在潮流计算中一般取为 PQ 节点、PV 节点或平衡节点。而分布式电源具有特殊性，其节点能否取为这 3 种类型需要全面考虑。正是因为各种分布式电源的运行方式和控制特性的不确定性，才使得在潮流计算中如何选取分布式电源的节点类型有待研究。现在最常用的方法是通过对于不同类型的分布式电源分别建立模型，使得分布式电源可以用通用的形式加入到配电网系统的潮流计算中去。

(2) 含分布式电源配网潮流计算的算法研究。在直接法的基础上，结合分布式电源本身的特点，文献[14]提出了一种基于灵敏度矩阵的补偿算法，该算法能够处理 PV 节点，并且还采用了系统节点阻抗矩阵中的元素组成了灵敏度矩阵，使得求取过程简便。文献把分布式电源的 PV、PQ(V) 以及 PI 节点转换为前推回代法可处理的 PQ 节点。考虑到 PV 节点难于转化为 PQ 节点，文献[15]提出了快速网络搜索法，对戴维南等值阻抗矩阵进行改进，通过形成与 PV 节点相关的节点阻抗矩阵的部分元素来修正 PV 节点注入的无功功率。文献[16]针对前推回代法对 PV 节点和环网失效的问题，提出了依据节点电阻矩阵、节点电抗矩阵及电压偏差对 PV 恒定型分布式电源和环网断点功率修正方法。

1.3 本文主要工作

本文第一章主要叙述了选题背景和分布式电源的配电网的前景和研究意义。

第二章介绍了各种分布式电源。

第三章介绍了配电网的基本算法，并比较了其中的优劣性。

第四章在含分布式电源配电网潮流计算方面，本文分局接口的模型的不同将 DG 分为 PQ、PV、P 和 PQ(V) 等四种节点类型，并为每种节点类型 DG 建立了潮流计算模型。在传统潮流计算方法的基础上，结合各点类型 DG 的潮流计算模型，提出了适用于含不同类型 DG 的配电网潮流计算方法，并以 IEEE33 算例验证了算法的可行性。



第二章 分布式电源的建模

2.1 太阳能光伏发电

太阳能是由太阳中的氢经过聚变而产生的一种能源，它分布广泛，可自由利用，取之不尽，用之不竭，是人类最终可以依赖的可持续的能源之一。太阳能是以辐射的形式每秒向太空发射 $3.8 \times 10^{19} \text{MW}$ 能量，其中有 22 亿分之一的能量投射到地球的表面。地球上一年接受到的太阳辐射能高达 $1.8 \times 10^{18} \text{kW} \cdot \text{h}$ ，是地球能耗的数万倍，由此可见太阳的能量有多么巨大。现如今由于能源短缺和环境污染，各国都开始迅速大力发展光伏发电技术。美国提出“太阳能先导计划”意在降低太阳能光伏发电的成本，使其 2015 年达到商业化竞争的水平；日本也提出在 2020 年达到 28GW 的光伏发电总量计划；同时我国也大幅增加对光伏发电的投入，并降低光伏发电并网价格，等等显示了发展光伏发电已经成为全世界各国解决能源与经济，环境之间矛盾的最有效的途径之一。

2.1.1 光伏发电的工作原理

在自然界中，根据导电性能和电阻率的大小，可以将物体分为三类：导体、半导体和绝缘体。其中在阳光下的半导体 p-n 结器件光电转换效率最高，即在半导体吸收光能后，在其内部可以传导电流的载流子分布和浓度都将发生改变，由此产生出电流和电动势的效应。当太阳光照在半导体 p-n 结上形成新的空穴-电子对时，在 p-n 结电场的作用下，空穴由 n 区流向 P 区，电子由 P 区流向 n 区，接通电路后就形成电流。光伏电池正是利用了半导体材料的光电特性，把光能直接转换成电能。

光伏发电系统可分为两种类型：（1）独立运行的光伏发电系统；（2）并网运行的光伏发电系统。独立运行常用于小容量用户或无电地区，需要提供蓄电池等储能设备；并网运行主要用于大容量用户如公用建筑、住宅等，一般都是自发自用，可以不带储能装置，但必须和商用电网联网，在国家电网允许的情况下将多余的电向电力公司出售电力。其中并网运行的光伏发电系统又分为标准型（不能切换为独立型）和防灾型（可切换为独立型），显而易见的是并网运行的光伏发电系统已经成为光伏发电的发展趋势。

通常情况下，配电网是利用并网型光伏发电的有功功率，也就是说把太阳能通过光伏组件转换为直流，然后通过汇流箱和直流配电柜，经过逆变器将直流电转换为交流电输出，再通过变压器将电压升压输入更高电压的配电网中。然而在一些特定的情况下，可以损失一部分输出的有功功率来控制逆变器对配电系统进行无功优化，使得电网运行更加的经济和稳定。



2.1.2 光伏发电的模型

为了更有效的分析光伏电池的发电性能以及计算配电网的潮流数据，建立了一种常见太阳能光伏电池的数学模型。通过这些数学关系表达式，可以反映出太阳能光伏电池各项参数的实际变化规律，图 2.1 为硅太阳能电池实际的等效电路。

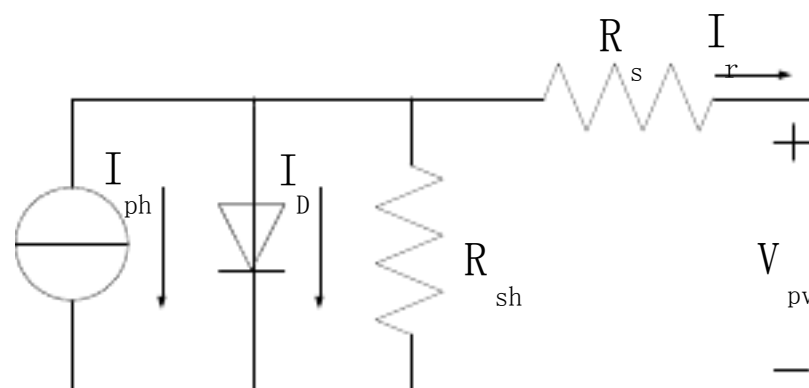


图 2.1 硅太阳能电池实际的等效电路

通过电路分析可以得到一个光伏电池的数学模型：

$$I_{pv} = I_{ph} - I_j \left(e^{(V_{pv} + R_s I_{pv}) / A n k T} - 1 \right) - (V_{pv} + R_s I_{pv}) / R_{sh} \quad (2.1)$$

其中

$$I_j = I_{jr} \left(T / T_r \right)^3 e^{(1/T_r - 1/T) q E_g / A k} \quad (2.2)$$

$$I_{ph} = [I_{scr} k (T - T_j)] S / 100 \quad (2.3)$$

$$T = 0.32 + 0.25 S + 0.899 T_a + 1.3 w_s + 273 \quad (2.4)$$

式中参数见表 2.1。

光伏方阵是由大量的光伏组件串联或者并联组合而形成的。光伏组件串联可以升高系统的最高输出直流电压；而采用光伏电池并联则可以升高系统的最高输出直流电流。因而，若想得到最高输出直流电压或者最高输出直流电流就可以对光伏电池进行串、并联组合。于是就可以获得光伏组件的输出特性方程：

$$P_{pv} = V_{pv} I_{pv} = m V_{pv} \left[I_{ph} - I_j \left(e^{(V_{pv} + R_s I_{pv}) / A n k T} - 1 \right) - (V_{pv} + R_s I_{pv}) / R_{sh} \right] \quad (2.5)$$

$$I_{pv} = m \left[I_{ph} - I_j \left(e^{(V_{pv} + R_s I_{pv}) / A n k T} - 1 \right) - (V_{pv} + R_s I_{pv}) / R_{sh} \right] \quad (2.6)$$

其中：n 为串联电池数，m 为并联电池数，上述公式参数解析详见表 2.1。

光伏发电系统一般是自发自用，而多余的电力则经过入网许可之后，可以并入国家电网公司和电力公司，将其多余电力卖给他们。

但通常来说，最好是能够自发自用的光伏电站，因为远距离传输电力的技术发展还不是十分成熟。所以我们需要在建造光伏电站之前，需要考虑附近是否有需要其相应规模的用户需求。



表 2.1 光伏电池等效电路参数表

参数名称	描述
q	电子的电荷量= 1.6×10^{-19} (C)
A	理想因子 (1.5—3)
R_s	太阳能电池的等效串联电阻
R_{sh}	太阳能电池的等效并联电阻
T_r	基准温度=301.18 (K)
k_j	短路电流温度系数0.0017 (A)
T_a	环境温度(°C)
T	电池温度(K)
E_G	硅原子频带间隙的能量(1—3eV)
I_{pv}	太阳能电池的输出电流
V_{pv}	太阳能电池的输出电压
I_{ph}	光生电流
k	玻尔兹曼常数= 1.38×10^{-19}
w_s	风速 (m/sec)
S	整体日光辐射 (Mw/cm ²)
I_j	光伏电池反相饱和电流
I_{jr}	基准温度下反向饱和电流 = 19.9693×10^{-6} (A)
I_{scr}	电池短路电流=3.3 (A)

光伏发电需要通过逆变器并网,上述模型是在逆变器的效率假定为恒定时情况下建立的。而事实上输入功率的变化会引起逆变器的效率随着改变,这就要对逆变器的输入功率进行矫正,公式如下:

$$P_{inv} = 0.015 + 0.98P_{pv} - 0.09P_{pv}^2 \quad (2.7)$$



其中： P_{pv} 为光伏阵列的输出功率， P_{inv} 为输入电网的功率。

通常情况下光伏并网发电系统根据控制逆变器的输出电流或输出电压可分为电流控制模式和电压控制模式。（1）若采用电流控制逆变器策略，则为输出的有功和注入的电流均是恒定的 PI 节点；（2）若采用电压控制型策略，则为输出的有功和电压均恒定的 PV 节点，当注入的电流达到边界值后转化为电流控制型来处理。图 2.2 为光伏发电并网示意图。

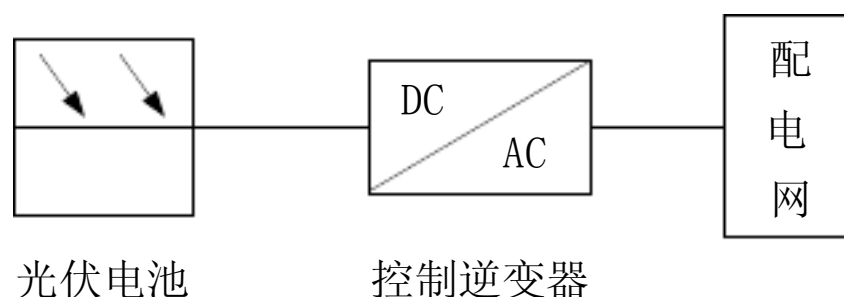


图 2.2 为光伏发电并网示意图

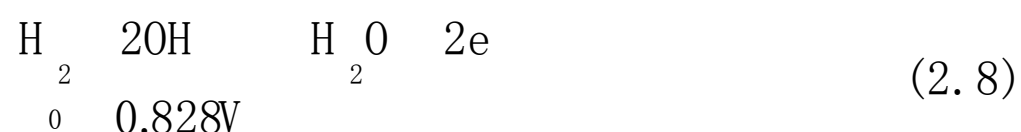
2.2 燃料电池

燃料电池 (fuel cell FC) 是一种将燃料和氧化剂的化学能直接转换成电能电化学反应装置^[24]。燃料电池的工作方式与常规的化学电源不同，而更类似于汽油、柴油发电机。它的燃料和氧化剂是储存在电池外的储罐中，当燃料电池发电时，要不断的向电池内注入氧化剂和燃料进行反应并排除反应产物，而且还要排出大量的废热来保持燃料电池工作温度的稳定程度。燃料电池只决定输出功率的大小，而其储能量则是由储罐内的燃料与氧化剂的量来决定。

适用于分布式电源应用的 FC 有质子交换膜燃料电池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) 熔融碳酸盐燃料电池 (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) 固体氧化物燃料电池 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 其中 SOFC 发电效率最高，适用范围最广。

2.2.1 燃料电池的工作原理

燃料电池由阳极、阴极和电解质隔膜构成。燃料在阳极氧化，氧化剂在阴极还原，从而完成整个电化学反应。以石棉膜型氢氧燃料电池为例，在阳极，氢气与碱中的 OH 在电催化剂的作用下，发生氧化反应生成水和电子：



电子通过外电路到达阴极，在阴极电催化剂的作用下，参与氧的还原反应：



$$\begin{matrix} 0.50 & H & 0 & 2e & 20H \\ 2 & 2 & & & \\ 0 & 0.40IV & & & \end{matrix} \quad (2.9)$$

2.2.2 燃料电池的模型

燃料电池及其它储能系统发出的是直流电，需要通过电压源逆变器并网。并网燃料电池发电站常见等值电路如图 2.3 所示。

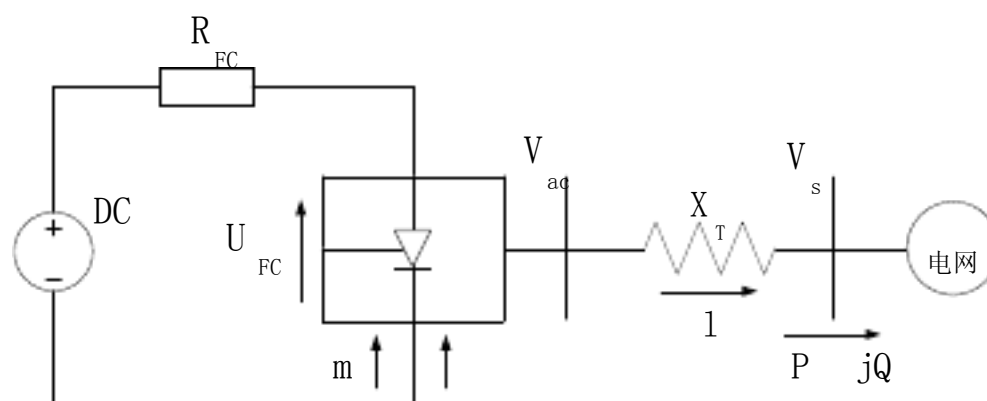


图 2.3 燃料电池发电站并网的等值电路图

图 2.3 中： U_{FC} 为电池输出的直流电压； R_{FC} 为电池的内阻； m 为换流器的调节指数； m 为换流器点燃角（或超前角）； V_{ac} 为换流器输出的交流电压； X_T 为变压器等值电抗； V_s 为系统母线电压； δ 为电压的相角，且满足 $V_{ac} = mU_{FC}$ 。由图和式可以推出下式：

$$P = \frac{V_{ac} V_s}{X_T} \sin(\delta) = \frac{mU_{FC} V_s}{X_T} \sin(\delta) \quad (2.10)$$

$$Q = \frac{V_{ac} V_s \cos(\delta)}{X_T} - \frac{V_s^2}{X_T} = \frac{mU_{FC} V_s \cos(\delta)}{X_T} - \frac{V_s^2}{X_T} \quad (2.11)$$

由公式 (2.10) 和 (2.11) 可得出以下结论：并网的燃料电池通过逆变器的控制参量 m 、 δ 来控制有功和无功的输出，因而燃料电池可处理成 PV 节点。但逆变器无功输出是有上限的，当出现无功越限，则转化为 PQ 节点来处理。图 2.4 为燃料电池并网示意图。

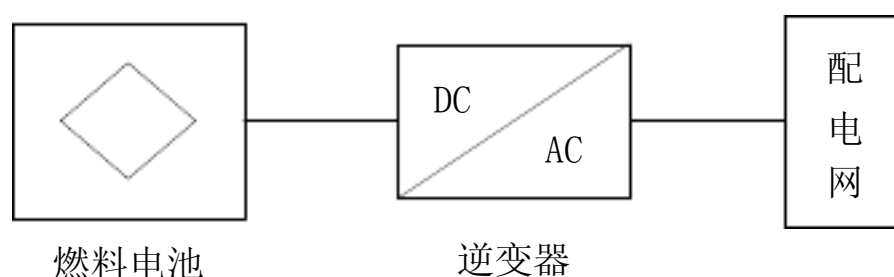


图 2.4 燃料电池并网示意图



2.3 风力发电

人类把风能作为能源用于碾磨谷物、抽水、船舶等机械设施提供动力已经有千余年的历史。风能是一种重要的自然能源，也是一种巨大的、清洁的、永不枯竭的可再生能源。与传统能源相比，风力发电不需要依赖矿物能源，没有燃料价格的风险，所以其发电成本稳定，没有碳排放等环境成本压力。

大气压的高地形成了空气流动，正是因为大气压的不稳定性，使得风能具有随机性并随高度的变化而变化。如今，风能的主要应用是风力发电，风力发电是通过风力发电机组的运行实现风能到机械能，再到电能的转换。因为海上风速通常高于内陆，近几年来，海上风电将会扮演越来越重要的角色，其原因是风速对发电量影响极大，因而它是电量成本的主要决定因素。粗略的说，在风速为 8m/s 的地点开发风电场，电量成本约为风速为 5m/s 地点的 1/3。下面分别介绍风机和风力发电机的模型。

2.3.1 风力发电的工作原理

风力发电技术是将风能转化为电能的发电技术，其工作原理是：风作用载风力机的叶片上产生转矩，该转矩驱动轮毂转动，通过齿轮箱高速轴、刹车盘和连轴器再与异步发电机转子相连，从而发电运行。

2.3.2 风力发电的模型

1. 风机模型

风力发电的效能受风速大小、风力机叶片以及叶片受风面积等多个因素的影响。风力发电机输出的机械功率为：

$$P_m = 0.5 A v^3 C_p \quad (2.12)$$

式(2.12)中， A 是风力机的扫描面积(m^2)； v 是风速(m/s)； ρ 是空气密度(kg/m^3)； C_p 是风力机的风能利用系数，为叶尖率比和叶片桨距角的函数，它表明风轮机从风中获得的有用风能的比例。从公式(2.12)可以看出，理论上风力机产生的电力大小是与受风面积成正比，与风速的三次方成正比，其中 A 和 v 随地理位置、海拔、地形等因素而变化。将风力发电机组的有功出力视为风速的函数，若给出风力发电场所地的风速，可以近似得到风力发电场输出的有功功率。在某一时刻对配电网进行潮流计算时，可以认为风力发电机组在该时刻的输出功率为一由该时刻风速所决定的定值。

在正常运行情况下，理想风力机吸收功率的特性可分为：当风速在启动风速到额定风速范围内为线性段，风功率随风速增长而线性上升；当风速在额定风速到切出风速范



围内为水平段，风功率与风速无关，保持为常量。通过对风力发电机的合理控制，可以使发电机在一定的风速范围内保持恒功率运行。

2. 风力发电机模型

风力发电机组按照发电机类型可分为三类：普通异步风机（无电力电子变频器）、双馈感应风机（采用部分功率电力电子变频器）和多级同步风机（采用全功率电力电子变频器）。

(1) 异步风机并网

异步发电机自身没有励磁装置，因而它没有电压调节能力。考虑到异步发电机在输出有功功率的同时还要从系统吸收一定的无功功率，其吸收的无功功率大小与转差率 s 和节点电压 U 的大小密切相关，因而在潮流计算中既不能作为 PQ 节点也不能作为 PV 节点，需要特殊考虑。

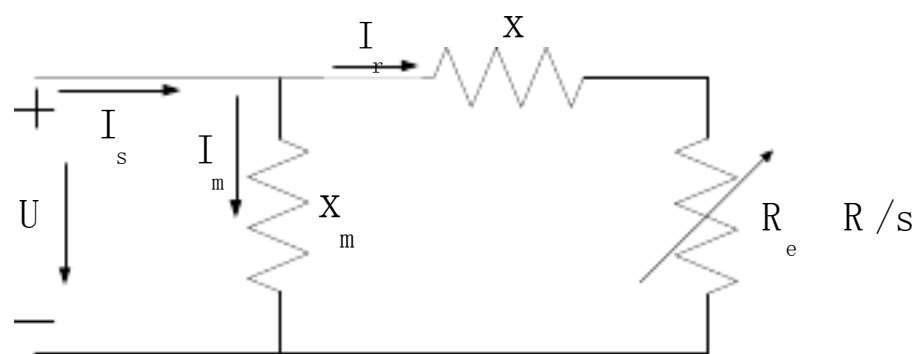


图 2.5 异步发电机的近似等效电路

图 2.5 所示为异步发电机的近似等效电路 [30]， I_s 为定子电流 (A)； I_r 为转子电流 (A)； I_m 为励磁电流 (A)； s 为转差率； U 为发电机的节点电压幅值； R 为转子电阻 (Ω)； R_e 为机械负载等效电阻 (Ω)； X_m 为励磁电抗 (Ω)； X 为漏电抗 (Ω)。

由近似等效电路可以推出发电机输出电磁功率的计算式和功率因数角正切公式，分别为：

$$P_e = \frac{sRU^2}{s^2X^2 + R^2} \quad (2.13)$$

$$\tan \theta = \frac{R^2 + X(X_m + X)s^2}{RX_m s} \quad (2.14)$$

式(2.13)中的 P_e 为风力发电机发出的有功功率。

(2.14)中的 s 转差率可由式(2.13)推出

$$s = \frac{R(U^2 \pm \sqrt{U^4 - 4X^2 P_e^2})}{2P_e X^2} \quad (2.15)$$

当风速给定时，根据风力发电机的有功功率输出特性可以确定出有功功率，由式(2.13)和(2.14)知，无功功率 Q 可由式(2.16)求出



$$Q_e = P_e \tan \frac{R_2 + X_m (X_s + X_m) s^2}{R X_m s} P_e \quad (2.16)$$

由此公式(2.16)可知，异步发电机节点类型具有如下特点：发出的有功功率是确定值，而无功功率则与机端电压有关。本文在潮流计算中将这种电源节点定义为电压静特性节点，即：P 恒定，V 不定，Q 受 P、V 限定的 PQ(V) 型节点。

(2) 双馈感应风机和多级同步并网

双馈感应机因它的发电机定子直接馈入电网，转子通过部分功率变频器馈入电网而得名，它和同步风机均一起属于变速恒频的风电机组，可以通过变频控制系统将发电机有功、无功功率实现解耦控制，从而调节改善风电场的功率因数和电压稳定性。因而，在潮流计算中二者可以作为 PQ 节点处理。



第三章 配电网潮流计算

3.1 配电网潮流计算的概述

潮流计算就是采用一定的方法确定系统中各处的电压和功率分布。电力系统的潮流计算和一般交流电路计算的根本差别是：后者已知电压，待求电流，而前者是已知电压，待求功率。而正是这一差距决定了二者本质上的区别：描述交流电路特性的方程，如节点电压方程、回路电流方程，是线性方程，而描述电力系统稳态运行特性的潮流方程却是非线性方程。

因为配电网线路中的 R/X 比值偏大使得快速 PQ 解耦法潮流计算方法失效，所以人们根据辐射配电网的特点，提出了其他一些计算方法。常规算法主要有基于导纳矩阵或回路阻抗矩阵的算法（牛顿—拉夫逊）算法、电源叠加法和追赶法，基于支路变量的潮流算法如支路电流回代法和支路功率前推回代法等。一拉夫逊法潮流算法有二阶收敛特性，虽然在配电网潮流中它的收敛速度较快，但是，当导纳矩阵阶数较高的时候，初值敏感性问题会比较突出。电源叠加法每次求解时都要对各个电源逐一进行叠加，求解方式较为繁琐。追赶法则用于导纳矩阵主对角严格占优情况下，无收敛性问题、矩阵存储方便、占内存少、求解快速，但是不能直接求解复杂的环网。前推回代法则具有编程简单、没有复杂的矩阵运算、计算速度快、占用计算机的资源很少、收敛性好等特点，适用于在实际配电网中的实际应用。

配电网潮流算法是配电网网络分析的基础。配电网的网络重构、故障处理、无功优化和状态估计等都需要用到配网潮流的数据。配电网的潮流计算同时也是研究配电网稳态运行的一项基本运算。根据给定系统的网络结构和运行条件可以确定整个系统的运行状态：主要是各个节点的电压（幅值和相角），网络中功率分布及功率损耗等。它既是对配电网规划设计和运行方式进行定量分析的依据，也是电力系统静态和暂态稳定计算的基础。

3.1.1 配电网潮流计算的基本要求

配电网潮流计算一般要满足下列要求：

1. 可靠收敛；
2. 计算速度快；
3. 使用方便灵活，调整和修改容易，可满足工程上的需求；
4. 内存占用量少等。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/627145160166010051>