

配电网继电保护 与故障处理

刘 健 同向前 张小庆 郭琳云 张志华 刘 超 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

配电网继电保护 与故障处理

刘 健 同向前 张小庆 郭琳云 张志华 刘 超 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要包括配电网的结构及其等值电路、含分布式电源配电网的短路电流计算、配电网的继电保护技术、配电自动化技术、配电网多级继电保护协调配合、集中智能与分布智能协调配合的配电网故障处理、面向可靠性的配电自动化系统规划,共7章。

本书可为从事配电网及其自动化研究、分布式电源及微网控制研究的相关人员提供有益参考,也可供高等院校的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

配电网继电保护与故障处理/刘健等著. —北京:中国电力出版社, 2014.10

ISBN 978-7-5123-6358-8

I. ①配… II. ①刘… III. ①配电系统—继电保护
②配电系统—故障修复 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 189022 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014年10月第一版 2014年10月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 16印张 274千字

印数 0001—2000册 定价 48.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

据统计,超过 85% 的故障停电是由于配电网故障造成的。因此,配电网故障处理对于提高供电可靠性具有重要意义。

快速的故障处理需要借助自动化技术,自动化装置和系统应追求“简单、可靠、实用”,并且简单了才能可靠,可靠了才能实用。

配电自动化系统只是进行配电网故障处理的一种手段,应根据各个区域对供电可靠性要求的不同而差异化建设,不能见开关就装终端、是终端就要“三遥”,要恰当地规划“三遥”、“两遥”终端、故障指示器、断路器、负荷开关、分界开关的数量和位置,不要“为了自动化而自动化”。

发展不需要借助通信通道的就地功能,如继电保护配合、备自投等,即使在建有配电自动化主站以集中智能参与故障处理的情形,就地功能也具有响应快速、不受通信影响等优点,与集中智能协调配合取长补短,可以大大提高故障处理性能。但是,要指出的是,没有必要对继电保护配合提出 100% 的要求,因为在配电网很难实现 100% 配合,只要针对大部分典型故障情形有效即可,因为还有集中智能配电自动化作为补充。

分布式电源的接入对配电网的故障处理会有所影响,但是设计恰当的话,在相当大的接入比例下,传统的故障处理策略都能适应,稍加改进后的故障处理策略还可以应对分布式电源更大比例接入的挑战。

上述内容就是作者团队最想在本书中与广大读者分享的科研工作心得,书中不妥之处也希望广大读者批评指正。此外,本书未涉及中性点非有效接地配电网单相故障处理的相关内容,对于在配电网单相故障处理领域的研究成果,作者将专门著书加以论述。

本书第 1 章、第 2 章和第 3 章由同向前和张小庆共同著写,第 4 章和第 6 章由刘健著写,第 5 章由刘健、郭琳云和刘超共同著写,第 7 章由刘健和张志华共同著写。

在本书撰写过程中，感谢国家电网公司林涛高级工程师，清华大学董新洲教授，西安交通大学张保会教授、索南加乐教授、宋国兵教授，中国电力科学研究院赵江河教授，国网电力科学研究院沈兵兵教授、顾欣欣教授，许继集团赵奕高级工程师等同行学者与作者团队的交流、讨论和无私教诲。

刘 健

2014 年夏于西安



目 录

前言

第 1 章	配电网的结构及其等值电路	1
1.1	配电网的网架结构	1
1.2	配电网的元件及其参数	11
1.3	配电网的等值电路	23
1.4	三相不对称网络的序网络处理	30
1.5	本章小结	37
第 2 章	含分布式电源配电网的短路电流计算	38
2.1	短路类型	38
2.2	短路过程分析及短路参数	39
2.3	配电网三相短路电流的计算方法	43
2.4	分布式电源的处理方法	48
2.5	含分布式电源配电网的短路电流的计算方法	57
2.6	本章小结	75
第 3 章	配电网的继电保护技术	76
3.1	概述	76
3.2	配电网的控制技术	77
3.3	传统无源配电网的保护技术	82
3.4	有源配电网的保护技术	96
3.5	本章小结	104
第 4 章	配电自动化技术	105
4.1	基于自动化开关设备相互配合的馈线自动化技术	105

4.2	集中智能配电自动化技术与传统故障定位规则·····	113
4.3	含分布式电源配电网对传统故障定位规则的适应性·····	115
4.4	应对更大容量分布式电源接入挑战的故障定位方法·····	140
4.5	故障隔离后健全区域供电的优化恢复·····	145
4.6	本章小结·····	157
第5章	配电网多级继电保护协调配合·····	159
5.1	基于时间级差的配电网多级保护配合·····	159
5.2	基于3段式过电流保护的配电网多级保护配合·····	167
5.3	配电网多级保护配合模式和整定方法·····	184
5.4	实例分析·····	194
5.5	本章小结·····	196
第6章	集中智能与分布智能协调配合的配电网故障处理·····	198
6.1	集中智能与分布智能配电网故障处理概述·····	198
6.2	各种故障处理策略的比较分析·····	199
6.3	集中智能和分布智能协调控制的原则·····	203
6.4	多级纯时间级差保护与电压—时间型馈线自动化的配合·····	205
6.5	多级纯时间级差保护与合闸速断型配电自动化的配合·····	207
6.6	多级纯时间级差保护与邻域交互快速自愈型配电自动化的配合·····	208
6.7	多级继电保护与集中智能配电自动化的配合·····	210
6.8	本章小结·····	217
第7章	面向可靠性的配电自动化系统规划·····	219
7.1	影响供电可靠性的因素·····	219
7.2	配电自动化终端数量确定方法·····	221
7.3	配电自动化系统的差异化规划·····	229
7.4	本章小结·····	242
附录	符号表·····	244
参考文献 ·····		246

配电网在电力系统中起着承上启下的作用,它从输电网接受电能,经过降压变换之后直接分配给工业和民用电力用户。配电网的可靠性直接影响着用户供电的可靠性,配电网的供电效率直接影响着电网的经济性,配电网的结构合理性也直接影响到给用户提供的电力的品质。配电网的结构是影响配电网技术性能的主要因素。

在电力系统中,配电网的网络结构是最复杂的,灵活多样,但根据技术经济性分析,也有一些典型的结构。分布式电源技术和微电网技术的兴起和发展使传统的配电网结构发生了根本性改变,原来的无源配电网变成了有源配电网,原来的无源孤岛可能成为含有分布式电源并可孤岛运行的局部电网或微电网。

1.1 配电网的网架结构

配电网的网架结构是指配电网中由电源向各个电力负荷的供电线路及其主要电气元件的电气连接方式。实际系统中的网架结构是多种多样的,但是从主干线路而言,通常存在一些典型的接线方式,譬如辐射式结构、环网结构、多主一备的 $N+1$ 结构等。

配电网的最终目的是对电力用户供电,其中 10kV 配电网是适合于对大多数工业与民用负荷供电的电压等级。据统计,全国发电量的 80%是在城市电网内消纳的,其中 70%是通过 10kV 公用配电网供电的。10kV 配电网已成为电力系统供电能力、电能质量、供电可靠性等重要指标的集中体现。

1.1.1 配电网网架结构的基本要求

对配电网网架结构的基本要求是:结构简单、层次清晰、运行灵活可靠、线损及运营成本相对较低。针对城市配电网负荷密度高、容量大、可靠性要求高、线路走廊紧张、设备占地空间狭小的特点,还要求配电设备

小型化。

评价配电网结构的优劣主要从技术指标、经济指标和后续可发展程度来考虑^[1,2]。其中,技术指标包括供电可靠性、容载比、电能质量、短路容量与通信干扰等,经济指标包括建设成本和运行成本。

1. 评价配电网结构的技术指标

(1) 供电可靠性。供电可靠性是指配电网故障时对用户连续供电的可靠程度。中高压配电网一般应满足 $N-1$ 准则,即:①高压变电站中失去任何一回进线或一组变压器时,必须保证向下级配电网供电;②高压配电网中一条线路或变电站中一组降压变压器发生故障停运时,除故障段外,正常情况下不允许停电和设备过负荷;③低压电网中当一台变压器或电网发生故障时,应尽快将完好的区段切换至邻近电网恢复供电。

(2) 容载比。容载比是配电变压器及线路容量与所供负荷容量之比。容载比与变电站的变压器台数、配电网的导线截面、用户的重要性、同时率、功率因数等有关,一般情况下配电网的容载比约为 2。容载比也反映了配电网的设备利用率。

(3) 电能质量。配电网各级母线电压应满足国家电能质量相关标准对电压偏差、电压波动与闪变、电力谐波和三相电压不平衡度的要求。譬如:①35kV 及以上供电电压正负偏差的绝对值之和不超过额定电压的 10%;②20kV 及以下三相供电电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$;③220V 单相供电电压允许偏差为 7%与-10%。

(4) 短路容量。考虑到配电开关和导线的开断能力和短路电流效应,配电网各级电压的短路容量不应超出相关规定^[2]。若不满足要求,可采取选用高阻抗变压器、变压器低压侧加装限流电抗器等限流措施。

2. 评价配电网结构的经济指标

经济指标主要用建设成本和运行成本来衡量。

(1) 建设成本:包括不同网架结构下变电站、线路及配电设备的投资费用。

(2) 运行成本:包括线路损耗和设备损耗等运行费用以及线路和设备的运行、检修、维护费用。

3. 可发展性

配电网的可发展性主要是指配电网的可扩充性和配电自动化系统的应用。配电自动化可以提高配电网的供电可靠性,使用户的年停电时间降到最

小,也可以提高配电网的供电质量和降低线损。配电自动化是我国配电网发展的目标。

配电自动化系统的主要功能有:①配电网运行监测,包括配电网运行状态的监视和统计报告;②配电网自愈控制,包括配电网故障诊断与供电自动恢复;③配电网优化运行,包括配电网运行模拟和重构优化;④负荷监控与故障报修,包括用电负荷和电能质量的遥测、用电负荷控制和用户故障报修处理。

配电网的网架结构应有利于配电自动化系统的装配和升级改造,可根据配电自动化系统上述功能在实现上的方便灵活性来衡量配电网结构的可发展性。

1.1.2 架空配电网的典型结构与特点

采用架空线路的配电网,其典型的网架结构及其特点如下^[2~4]。

1. 辐射式网络结构

辐射式网络结构是由干线及其分支线构成的辐射状供电网络,如图 1-1 所示。该网络具有结构简单、投资小、便于新增及发展负荷等特点,但供电可靠性较差,也不满足 $N-1$ 安全准则。该网络结构通常适用于负荷呈点线分布、供电距离较长、对可靠性要求不高的场合,譬如农村电网或城市郊区电网。

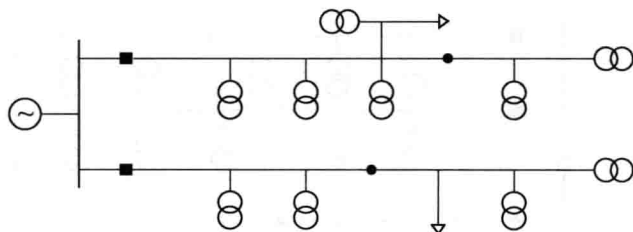


图 1-1 辐射式网络结构

2. 双回路网络结构

双回路网络结构又称双 T 接线,即每个用户都有两回线路给其供电,如图 1-2 所示。根据两回线路是否同杆架设,双回路网络结构又分为同杆双回和不同杆双回,相比而言,同杆双回投资小、对环境要求低、可靠性稍低。与其他网络结构相比,双回路结构具有可靠性高、线路成本高等特

点，一般只适用于供电距离较长、负荷较大、对供电质量有特殊要求的双电源供电用户。

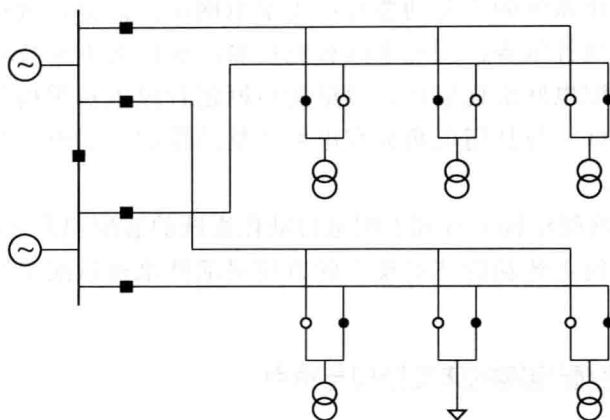


图 1-2 双回路网络结构

3. 普通环式网络结构

普通环式网络结构是指把某变电站同一母线或不同母线馈出的两回线路的中间或末端连接起来，构成环式网络，如图 1-3 所示。与辐射式网络结构相比，其投资稍有增加，但可靠性显著提高，具有较高的性价比，比较适合于负荷密度较大、可靠性要求较高的城市供电网络。

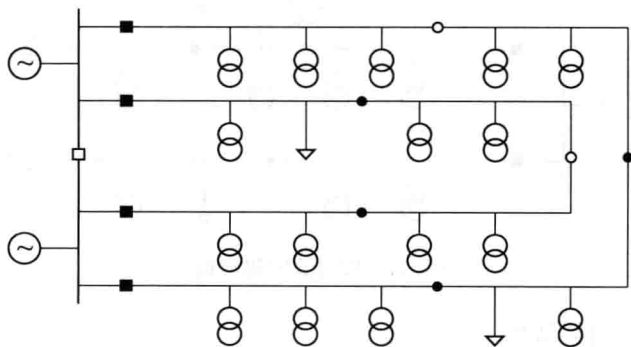


图 1-3 普通环式网络结构

4. 手拉手环式网络结构

手拉手环式网络结构是指把来自不同变电站或相同变电站不同母线馈出的

两回线路末端相连，形成一个两端都有电源供电的环式网络结构，如图 1-4 所示。手拉手环式网络通常采用环式设计、开环运行的策略，任何一端电源都可以承载近端负荷或整个线路的负荷，但是两端电源从不连通以避免环流。手拉手环式网络结构与普通环式网络结构相比，线路成本相当，但两个电源使其可靠性明显提高。手拉手环式网络结构也适合于负荷密度较大、可靠性要求较高的城市供电网络。

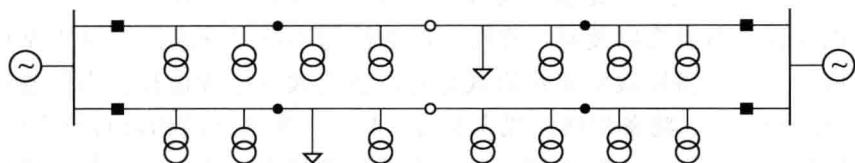


图 1-4 “手拉手”环式网络结构

5. 多分段多联络网络结构（网孔型）

如图 1-5 所示，多分段多联络网络结构又称网格网络结构，其特点是将线路主干线分为若干段，并把不同主干线的某些不同段连接起来，形成多分段多联络、多电源供电的格状网络结构。分段数的多少取决于地区负荷密度以及分段的经济性和可靠性效益。根据线路分段数、联络数的不同，又可分为两分段两联络、三分段三联络等网络结构。正常情况下，各联络点开关处于开断状态，供电网络呈辐射状开环运行；线路故障或停电检修时，通过联络开关和分段开关的操作，调整各干线的供电范围，提高了供电可靠性。多分段多联络网络结构适用于高可靠性要求的大中城市负荷密集区的配电网，配电网沿街道布置，构成一个个格子，供电可靠性很高。这种结构的缺点是：投资较大、系统设备需承受短路电流的多次冲击等。

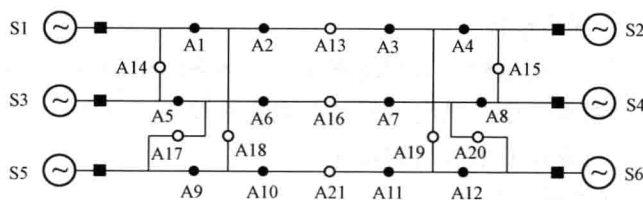


图 1-5 多分段多联络网络结构

1.1.3 电缆配电网的典型结构与特点

采用电缆供电的配电网，其典型的网架结构及其特点如下^[2~4]：

1. N 供一备网络结构

如图 1-6 所示， N 供一备网络结构是指由 N 条电缆线路通过末端连接成环网，其中一条线路不带负荷，仅作为公共备用线路。对于 N 供一备网络结构， N 值不同，网络供电可靠性、经济性和设备利用率也不同，应根据供电区域负荷密度以及对可靠性、经济性的不同要求选择不同的 N 值。正常情况下，非备用线路正常满载运行，备用线路空载运行；当某条运行线路出现故障时，将备用线路投入运行。 N 供一备网络结构具有投资较大、可靠性较高的特点，一般适用于对可靠性要求较高、集中末端的大用户负荷供电。

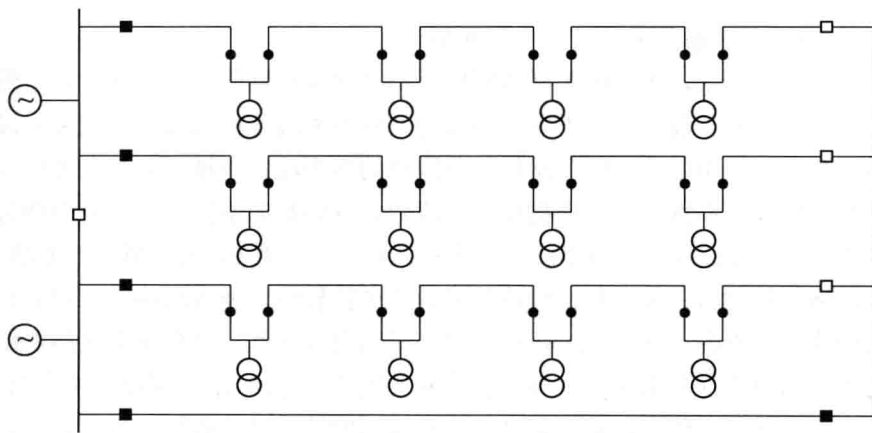


图 1-6 N 供一备网络结构

2. 普通环式网络结构

如图 1-7 所示，此结构与架空线普通环式网络结构相似，两条线路末端相连构成环网，均由单一电源供电。但是电缆线路投资成本高，一般适用于负荷密度较大、供电可靠性要求较高的城区网络。

3. 手拉手环式网络结构

如图 1-8 所示，此结构与架空线手拉手环式网络结构相似，两条线路末端相连构成环网，但是两条线路出自不同电源。由于电缆线路成本高，一般适用

于负荷密度较大、供电可靠性要求较高的城区网络。

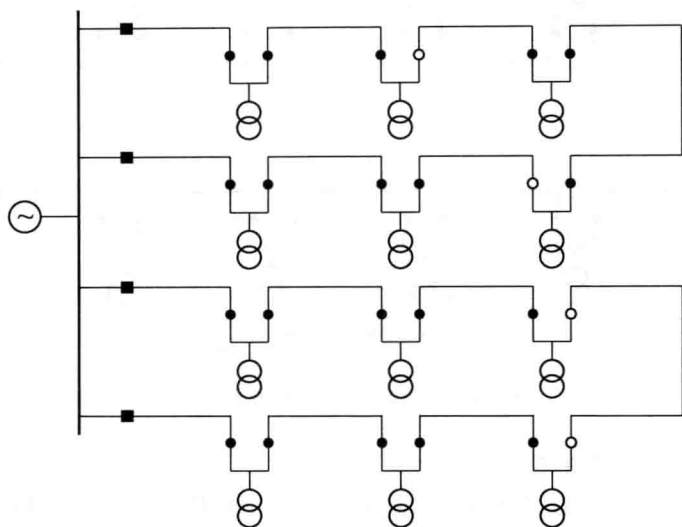
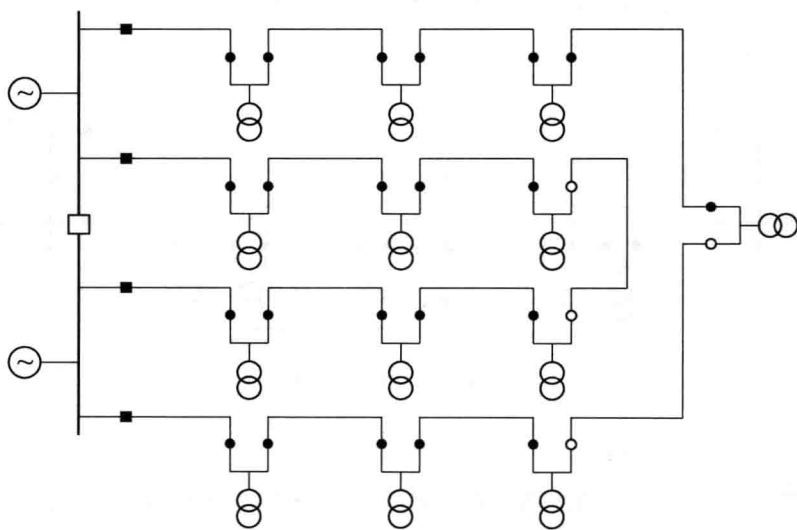
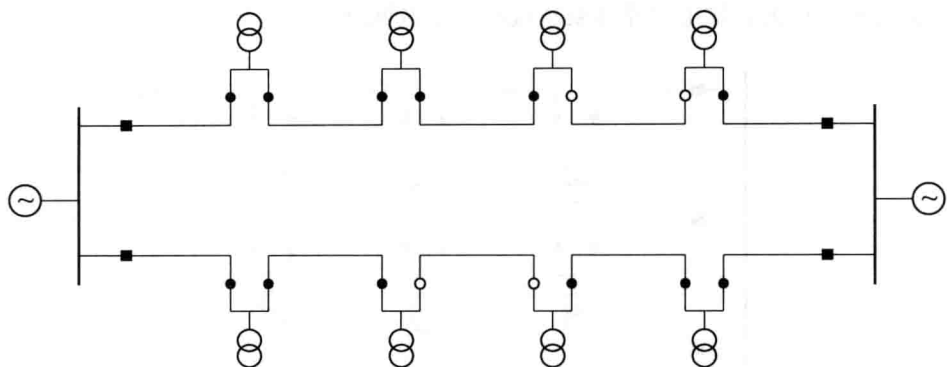


图 1-7 普通环式网络结构



(a) 同一变电站不同母线环网

图 1-8 手拉手环式网络结构 (一)



(b) 不同变电站间环网

图 1-8 手拉手环式网络结构 (二)

4. 双环式网络结构

如图 1-9 所示, 双环式网络结构是指每个用户均可以从 2 个独立的线路获取电源, 具有双环特征的网络结构。这种网络结构具有投资大、可靠性高、灵活性强的特点。如果这种网络结构再配置自动化装置, 故障停电时间将会非常短, 系统可靠性也非常高。因此该网络适用于高负荷密度、高供电可靠性要求的城区负荷供电。

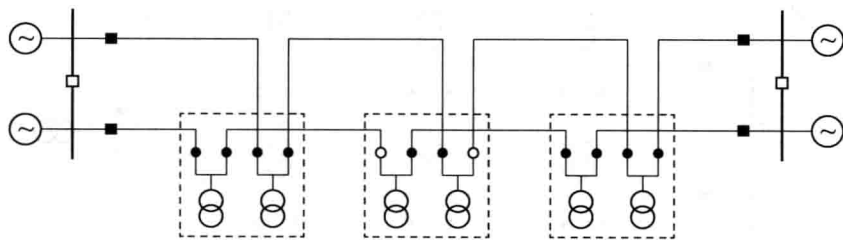


图 1-9 双环式网络结构

5. 三角形网络结构

如图 1-10 所示, 三角形网络结构是指由 3 条手拉手线路两两相连组成的外环网络结构。该结构的突出特点是: 不仅可实现手拉手网络结构功能, 还可以实现某电源故障时, 由另两处电源转带其所供负荷, 提高了手拉手网络结构的线路利用率。三角形网络结构一般适用于大型新区供电网络的规划建设。

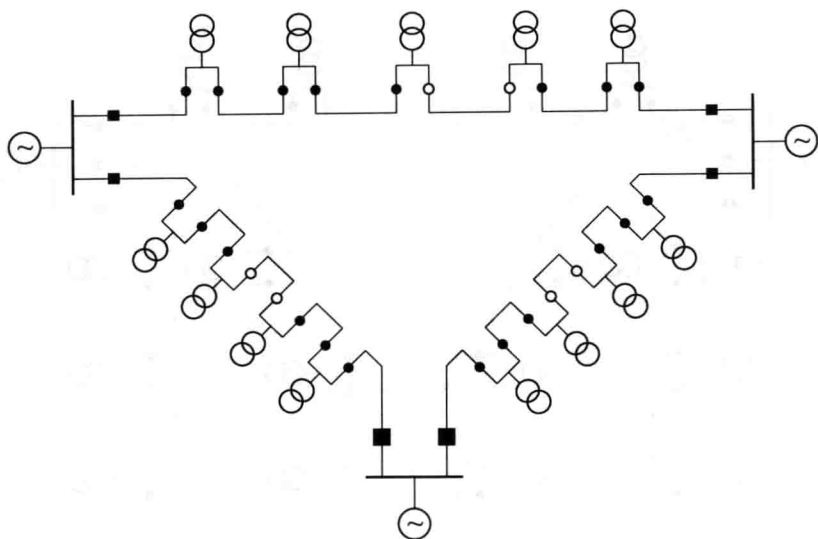


图 1-10 三角形网络结构

6. 四边形网络结构

四边形网络结构如图 1-11 所示。四边形网络结构对称、电源联络完备，使其具有投资小、可靠性高、网络损耗低、负载均衡、灵活性和可扩展性好等优点，适用于具有高负荷密度预期、高可靠性要求的新建大型社区。

1.1.4 含有分布式电源的配电网的结构与特点

分布式电源标志低碳经济时代的到来，分布式电源的兴起必将引起电力技术的巨大发展，但也会影响电力系统的各个方面，包括配电网网络结构的变革，譬如干线故障后可能形成局部孤岛运行的微电网等^[5]。

从配电网的结构上讲，含有分布式电源的配电网与常规配电网没有本质的区别，不外乎在原有配电网网架结构的基础上引入一些分布式电源而已，使原有的无源配电网演变为一个有源配电网，如图 1-12 所示。但是对配电网的运行、保护和自动化系统而言，分布式电源的引入将带来更大的影响，譬如分布式电源对配电网电压质量的影响、分布式电源对配电网短路电流的贡献、分布式电源对重合器动作的影响、有源局部电网或微电网的形成与运行等。微电网可看做配电网中的一个子网，也可以看做一个终端用户电网，随着微电网的发展，有学者建议未来电网应按照输电网—配电网—微电网三级电网进行规划^[6]。

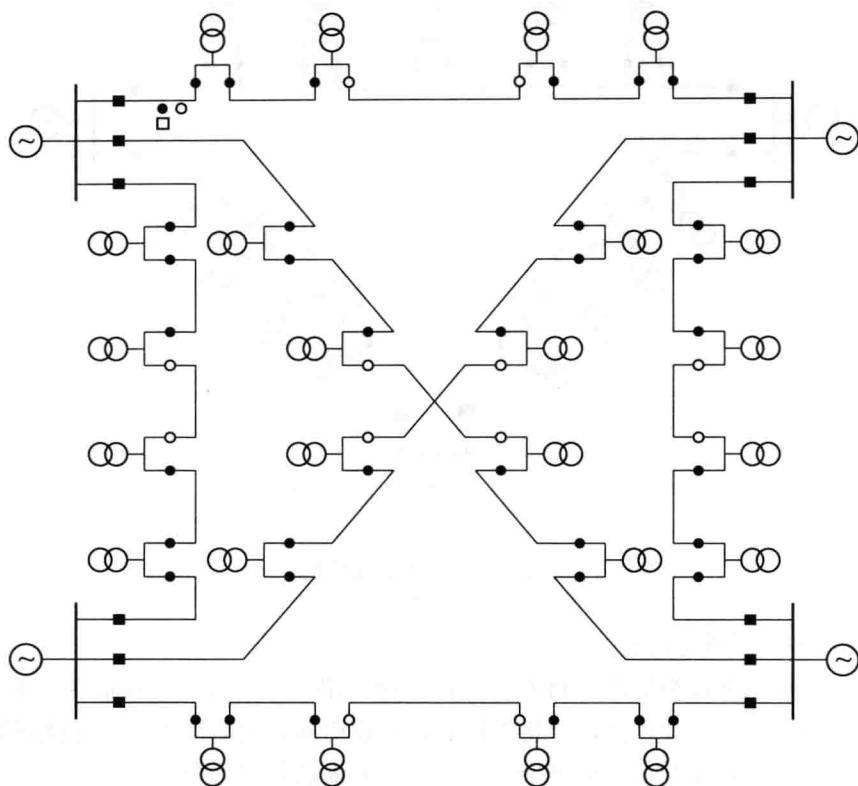


图 1-11 四边形网络结构

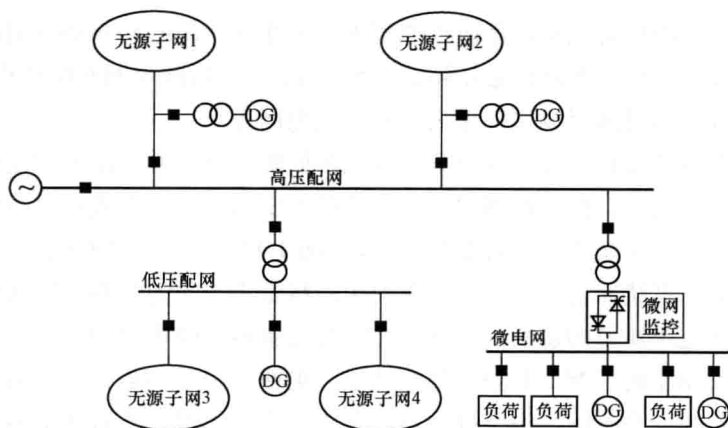


图 1-12 含有分布式电源的配电网