

1000MW 超超临界火电机组 电气设备及运行

*1000MW ultra supercritical thermal power generating
units electrical equipment and its operation*

主 编 郝思鹏
副主编 黄贤明 刘海涛

 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

1 000 MW 超超临界火电 机组电气设备及运行

主 编 郝思鹏
副主编 黄贤明 刘海涛



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

为适应电力工业发展要求,力求电气专业理论紧密联系最前沿电力生产实际,本书根据我国电厂1 000 MW 超超临界大型机组,介绍火电厂电气设备及运行,主要包括:①发电机、发电机辅助系统,发电机运行、事故处理及维护;②励磁系统及电力系统稳定器;③高压电气设备及维护;④厂用电系统及运行维护;⑤发电机-变压器保护等。

本书可以作为电气工程及其自动化、热能和动力工程等专业研究生教材,也可以作为高等院校、科研院所和企事业单位从事发电厂和电力系统工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

1 000 MW 超超临界火电机组电气设备及运行/郝思鹏主编. —南京:东南大学出版社, 2014. 12

ISBN 978-7-5641-5442-4

I. ①1… II. ①郝… III. ①火力发电—发电机组—电力系统运行 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 312751 号

1 000 MW 超超临界火电机组电气设备及运行

出版发行 东南大学出版社
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096
出 版 人 江建中
网 址 <http://www.seupress.com>
电子邮箱 press@seupress.com
经 销 全国各地新华书店
印 刷 江苏徐州新华印刷厂
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 20.25
字 数 505 千
版 次 2014 年 12 月第 1 版
印 次 2014 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-5442-4
定 价 64.80 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830。

前 言

由于能源紧缺,火电机组节能降损工作受到各国的普遍重视,为提高火电机组的热效率,许多国家把提高蒸汽参数,发展超超临界机组作为重要手段之一。我国对发展超超临界机组也极为重视,特别是近两年,大容量及高参数、高效率火电机组在火电装机总容量中占比持续增加,加快了百万千瓦级超超临界火电机组的建设步伐,超超临界机组越来越多的成为火力发电的主力机型,这对于电力设备的制造和运行水平提出了更高的要求,而发电厂运行人员及相关专业技术人员迫切需要系统了解和掌握超超临界机组中发电机、变压器、继电保护及自动装置等系列设备和装置的新性能、新特点及其运行维护新要求。

本书在编写过程中,深入广东平海、国电泰州、华电句容等发电厂,以大量的技术资料为基础,紧密结合现场实际运行状况,全面介绍了超超临界机组中同步发电机结构与运行维护、励磁系统、电力变压器、主要电气设备、发电厂电气主接线和厂用电系统、继电保护和自动装置、电气设备在线监测等内容。本书实用性强,多处给出了典型电厂的实例分析,易于学习和掌握,适合生产、科研、管理和其他工程技术人员参考使用。

本书由南京工程学院郝思鹏主编,黄贤明和刘海涛担任副主编,万诗新参与编写。全书共分为九章,其中第3章、第4章、第8章由郝思鹏编写,第1章、第5章、第6章第1节由刘海涛编写,第2章、第6章第2节由黄贤明编写,第7章、第9章由万诗新编写,全书由张仰飞教授担任主审。

本书在编写过程中得到了研究生楚成彪、张铭路、张济韬、刘少凡的大力协助,并参阅了大量正式出版文献以及多家电厂的技术资料,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,疏漏和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

1 绪论	1
1.1 电力系统概述	1
1.2 电力系统中性点运行方式	6
1.3 超超临界机组简介	12
2 同步发电机	17
2.1 同步发电机工作原理及本体结构	17
2.2 同步发电机的辅助系统	26
2.3 同步发电机运行	36
2.4 同步发电机的启动与停机	47
2.5 同步发电机的事故处理	51
2.6 同步发电机的运行维护与检修	57
3 励磁系统	64
3.1 励磁系统的作用及典型的励磁方式	64
3.2 励磁调节器	71
3.3 典型电厂 1 000 MW 机组励磁系统	75
3.4 电力系统稳定器(PSS)	86
4 电力变压器	90
4.1 变压器概述	90
4.2 变压器结构	95
4.3 变压器运行	107
4.4 主变的冷却系统	116
4.5 变压器维护及事故处理	120
4.6 典型电厂主变、高厂变和高备变规范	129
5 电气设备	137
5.1 高压断路器	137
5.2 电压互感器	154
5.3 电流互感器	161
5.4 隔离开关	167

5.5	发电机封闭母线	172
5.6	避雷器	184
6	电气主接线及厂用电系统	189
6.1	电气主接线	189
6.2	厂用电系统	206
7	厂用 UPS 及直流系统	216
7.1	UPS 系统	216
7.2	直流系统	224
7.3	蓄电池组	232
8	继电保护及自动装置	238
8.1	发电机保护	238
8.2	变压器保护	266
8.3	发电机-变压器组保护	284
8.4	厂用电保护	295
8.5	自动装置	300
9	电力设备在线监测	311
9.1	电力设备在线监测系统	311
9.2	主要电气设备的状态监测	315
	参考文献	318

1.1 电力系统概述

1.1.1 电力系统与电力网

电力系统是指由发电厂的电气部分、变电站、输配电线路和用户在电气上连接成的整体。在发电厂一次能源被转换为电能,在向用户供电的过程中,为提高供电的安全性、可靠性和经济性,通过各级变电站和输配电线路向用户供电。如果将汽轮机、水轮机、锅炉、水库、核反应堆等这些发电厂的动力部分包括在内,总体称为动力系统,电力系统是动力系统的一部分。

电力网是由电力系统中除发电机和用电设备以外的部分,即由升、降压变电站和不同电压等级的输电线路以及相关输配电设备连接在一起构成的,是电力系统的骨架部分。

1.1.2 电能生产的特点

1) 电能不能大量储存

电能的生产、传输、分配和使用是在同一时间完成的。发电厂任何时刻所产生的电能等于该时刻用户所消耗的电能。即电力系统中的功率在每时每刻都保持平衡。由于电能是一种能量形态的转换,因而生产和消费同时完成。目前虽然对于电能的存储在进行着一系列的研究,但是仍未解决大量存储的问题。因此,电能难以大量存储,是电力系统的最大特点。

2) 电力系统电磁变化过程的瞬时性

电能的传播速度接近光速,电能从一处送到另一处所需的时间仅为千分之几秒甚至百万分之几秒。而短路暂态过程、发电机稳定性的丧失,则在十分之几秒或几秒内发生。发电机、变压器、电力线路、电动机等元件的投入和退出都在一瞬间完成。也就是说电力系统从一种方式过渡到另一种运行方式的过程非常短暂。这就要求调整及切换速度非常迅速和灵敏,以防止短暂的过渡过程对电气设备产生危害,因此必须采用各种自动装置。

3) 与国民经济各部门之间的密切联系性

由于电能的转换非常方便,且易于大量生产、集中管理、远距离传送和自动控制,因此在国民经济各领域应用广泛。电能供应的中断或不足,将直接影响各部门的生产、运行和人民生活,这就要求电力系统的运行必须保证安全和具有足够的备用容量。

1.1.3 电力系统运行的基本要求

1) 保证供电的可靠性

中断用户的供电,会使生产停顿、生活混乱,甚至危及人身和设备的安全,给国民经济造成极大损失。因此,要保证供电的可靠性。保证系统各元件的工作可靠性,重视设备的正常运行维护和定期检修试验,提高运行水平,防止误操作,防止事故扩大化。

2) 保证良好的电能质量

电能质量有三个指标:电压、频率和谐波。一般电压偏移不超过用电设备额定电压的 $\pm 5\%$;频率偏移不超过 ± 0.2 Hz;波形指标不超过规定的畸变率。

3) 保证系统运行的经济性

在电能生产、传输、分配过程中,应尽量降低损耗,节约能源。电力系统运行中可以通过合理分配负荷,使得整个系统的电能成本降低;同时尽量采用单台容量较大的大型发电机组,降低单位功率的设备投资和运行损耗。电能成本降低不仅能节省能源,还可以使各用电部门降低成本,因而给整个国民经济带来很大的好处。

4) 保证充足的电力供应

随着国民经济日益发展和人民生活水平的不断提高,各行业、各部门对电能的需求也在不断增加。因此,电力系统应充分做好规划设计和电力建设,以确保电能的生产能满足需求,同时也应该加强对现有设备的维护保养,充分发挥潜力,确保充足的电力供应。

1.1.4 电力系统联网运行的优越性

随着电力工业的不断发展,电力系统的容量不断增加,电压等级不断提高,所跨区域不断扩大,形成了强大的联合电力系统。其优越性主要表现在:

- (1) 可以提高电网运行的可靠性;
- (2) 可以保证供电的电能质量;
- (3) 可以提高电气设备的利用率,减少系统的备用容量;
- (4) 可以采用技术经济性能好的大机组;
- (5) 可以充分利用各种自然资源,发挥各类发电厂的特点,提高电力系统整体经济性。

1.1.5 电力系统的接线方式

1) 电力系统的接线图

电力系统的接线图主要有电气接线图和地理接线图。电力系统的电气接线图如图 1.1 所示,在电气接线图上较详细地表示出电力系统各主要元件之间的电气联系,但不能反映各个发电厂、变电站的相对地理位置。

电力系统的地理接线示意图如图 1.2 所示。在地理接线图上,各发电厂、变电站的相对地理位置,乃至各条线路的路径都按一定比例有所反映,但各元件之间的电气联系却往往难以表示。因此,这两种接线图常结合使用。

2) 各种接线方式的特点

电力系统的接线方式可分为无备用和有备用两类。无备用接线包括单回路放射式、干线式和链式网络,如图 1.3 所示。

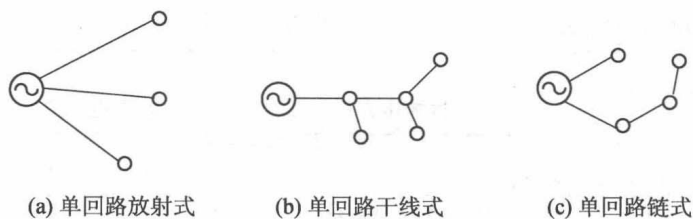


图 1.3 无备用接线方案

有备用接线包括双回路放射式、干线式、链式以及环式和两端供电网络,如图 1.4 所示。

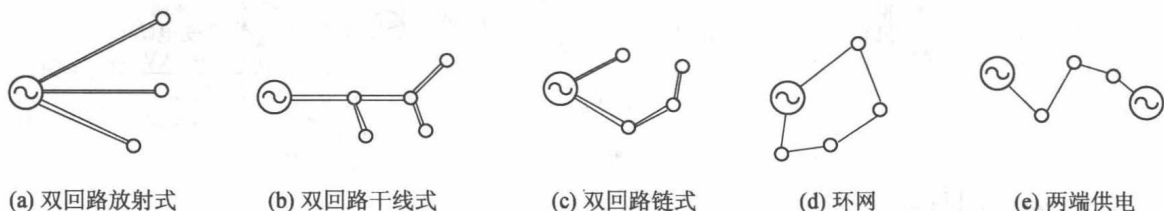


图 1.4 有备用接线方案

无备用接线的主要优点在于简单、经济、运行方便,主要缺点是供电可靠性差。因此该方式的采用必须考虑所供负荷的可靠性要求以及能否采用自动重合闸等。有备用接线中,双回路放射式、干线式、链式网络的优点在于供电可靠性和电能质量高,但所用设备多,接线复杂,投资大。环网接线同样有较高的可靠性,但经济性有所提高,缺点是运行调度较复杂,故障影响范围大。两端供电网络的前提是必须具备两个或两个以上的独立电源,而且它们与各负荷点的相对位置又决定了采用这种接线的合理性。

电力系统接线方式的确定必须建立在技术、经济性能科学比较的基础上,所选方式除了保证供电的可靠性、经济性和良好的电能质量外,还应保证运行操作的安全性和灵活性。

1.1.6 电力系统的额定电压

1) 额定电压等级

当输送功率一定时,输电电压越高,电流越小,导线等电气设备的投资越小。但电压越高,对电气设备绝缘的要求也越高,投资又有所加大。因此,为了便于实现电气设备选择、制造和使用的标准化、系列化,我国规定了标准电压(即额定电压)等级系列。在设计时,应选择最合理的额定电压等级,而不是任意选择。所谓额定电压,是指电气设备长期、连续正常工作的最高电压,在此电压下长期工作,能获得最佳的经济、技术性能。

我国规定的额定电压等级可分为三类,分别如表 1.1~表 1.3 所示。

第一类是 100 V 及以下的电压等级,主要用于安全动力、照明、蓄电池及其他特殊设备。

表 1.1 第一类额定电压(V)

直 流	交 流	
	单相	三相
6		
12	12	
24		
48	36	36

第二类是 100~1 000 V 之间的电压等级,它的应用最广、数量最多,如电动机、工业、民用、照明、普通电器、动力及控制设备等都采用此类电压。

表 1.2 第二类额定电压(V)

用 电 设 备			发 电 机		变 压 器			
直流	三相交流		直流	三相交流	单相		三相	
	线电压	相电压			一次线组	二次线组	一次线组	二次线组
110			115					
	(127)			(133)	(127)			
						(133)	(127)	(133)
		127	230	230	220			
220	220					230	220	230
		220	400	400	400			
	380						380	400

第三类是 1 000 V 及以上的电压等级。电力系统的发、输、变、配、用电都采用,由表 1.3 可见。同一电压等级下,各用电设备的额定电压不尽相同,故可分为用电设备、电力网、发电机和变压器四种额定电压。

表 1.3 第三类额定电压(kV)

用电设备	交流发电机	变 压 器		用电设备	变 压 器	
		一次线组	二次线组		一次线组	二次线组
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3	(60)	(60)	(66)
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6	110	110	121
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11	(154)	(154)	(169)
	13.8	13.8		220	220	242
	15.75	15.75		330	330	363
33	18	18		500	500	650
		35	38.5	750	750	825
				1 000	1 000	1 100

2) 电力网和用电设备的额定电压

设发电机在额定电压下运行,给电力网 AB 部分供电。由于线路有电压损失,所以负荷

1~5 点所受的电压各不相同。线路首端电压 U_A 大于末端电压 U_B 。若负荷沿线路分布均匀,则电压沿线路分布情况大致如图 1.5 中斜线 AB 所示。各处用电设备所受的电压不同,也不可能按上述分布电压制造,而且电力网各点的电压也是经常变化的,所以用电设备的额定电压只能力求接近于实际工作电压。通常用线路首、末端电压的算术平均值作为用电设备的额定电压,这个电压也即是该电力网的额定电压,用电设备额定电压就等于其所在电力网的额定电压。

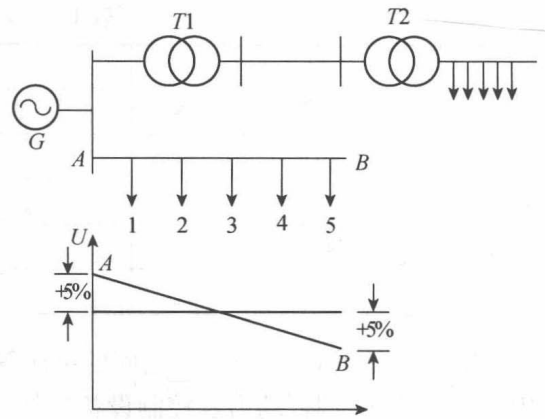


图 1.5 额定电压分析图

目前,我国电力网的额定电压等级有 0.4、3、6、10、35、60、110、220、330、500、750、1 000 kV 等。

3) 发电机的额定电压

发电机往往接在线路的始端,而一般电力网的线路电压损失为 10%,考虑到一般用电设备的允许电压偏移为 $\pm 5\%$,这就要求线路始端电压为额定值的 105%,从而保证末端不低于额定值的 95%,因此发电机的额定电压比其所在电力网的额定电压高出 5%。

目前,我国发电机的额定电压范围为:6.3~10.5 kV(100 MW 及以下小容量机组)、13.8 kV(135 MW 级的汽轮发电机及 72.5 MW 的水轮发电机)、15.75 kV(200 MW 的机组)、18 kV 及以上(300 MW 及以上大型发电机组),1 000 MW 发电机额定电压一般为 27 kV。

4) 变压器的额定电压

变压器一次侧接电源,相当于用电设备,二次侧向负荷供电,又相当于发电机。因此变压器一次侧额定电压应等于用电设备的额定电压(直接和发电机相连的变压器一次侧额定电压应等于发电机的额定电压),二次侧电压应较线路的额定电压高出 5%。但又因变压器二次侧电压规定为空载时的电压,而额定负荷下的变压器内部压降为 5%。为使正常运行时变压器二次侧电压较线路额定电压高 5%,变压器二次额定电压应较线路额定电压高出 10%。只有漏抗较小的、二次侧直接与用电设备相连的和电压特别高的变压器,其二次侧额定电压才较线路的额定电压高出 5%。

1.2 电力系统中性点运行方式

1.2.1 中性点的定义

电力系统的中性点是指三相系统作 Y 形连接的发电机和变压器的中性点。中性点采用不同的接地方式,对电力系统的供电可靠性、设备绝缘水平、对通信系统的干扰、继电保护的動作特性等都有着直接的影响,因此选择电力系统中性点的运行方式是一个综合性的问题。

目前,我国电力系统常见的中性点运行方式可分为两种类型:中性点非有效接地方式(或称小接地电流系统)和中性点有效接地方式(或称大接地电流系统)。其中非有效接地又

包括中性点不接地、经消弧线圈接地和经高阻抗接地；而有效接地又包括中性点直接接地和经低阻抗接地。其中应用最广泛的是中性点不接地、经消弧线圈接地和直接接地。

1.2.2 中性点不接地的三相系统

电力系统运行时，三相导体之间和各相导体对地之间沿导体全长均匀分布着电容。这些电容在电压的作用下将引起附加的电容电流。图 1.6(a) 为中性点不接地系统时的电路图，图中断路器 QF 运行时处于合闸状态，各相导体间的电容及引起的电容电流较小，其影响在此忽略不计。同时，为了简化讨论，假设三相系统完全对称，各相对地电容完全相等。

在正常工作状态下，电力系统的中性点 N 对地电压 $U_n = 0$ ，各相对地电压是完全对称的，即分别等于各自的相电压。在此对地电压作用下，各相对地电容电流大小相等，相位互差 120° ，各相对地电容电流之和为零，所以大地中没有电容电流流过。各相电源电流应为各相负荷电流与对地电容电流的相量和。

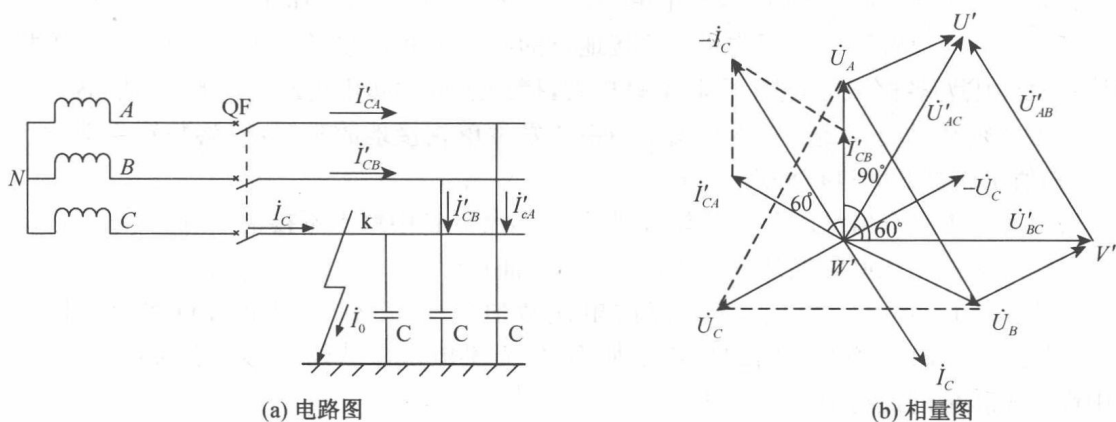


图 1.6 中性点不接地三相系统

如果发生单相接地故障，上述情况将会发生明显的变化。当 C 相发生完全接地时，故障相对地电压为零。中性点对地的电压不再为零，而上升到相电压，而且与接地相的电源电压相位相反。各相对地电压的相量图如图 1.6(b) 所示，夹角为 60° 。从图中可以得知，当 C 相完全接地时，故障相电压为零，非故障相对地电压升高到 $\sqrt{3}$ 倍相电压，三线的线电压仍然保持对称且大小不变。因此，对电力用户接于线电压的用电设备的工作没有影响，不必立即中断对用户供电。

由于 A 、 B 两相的对地电压由正常时的相电压变为故障后的线电压，非故障相的对地电流的有效值也增大到正常时相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。而故障相对地电容被短接， C 相对地电容电流为零。此时，三相对地电容电流之和不再为零，大地中有电流流过，并通过接地点形成回路，如图 1.6(a) 所示。如选择电流的参考方向为从电源到负荷的方向及线路到大地方向，可见单相接地时故障相流过大地的电流为电容电流，等于正常时一相对地电容电流的 3 倍。其数值与电网的电压、频率和一相对地电容有关，而对地电容又与线路的结构（电缆线路或架空线路）、布置方式和长度以及其他因素有关。

发电机的一相接地电容电流可用 $I_c = 0.544U_n C_g$ 来进行估算, U_n 为发电机额定电压, C_g 为发电机一相对地电容, 其值由制造厂提供或通过试验取得。

以上分析是完全接地的情况。当发生不完全接地时, 即通过一定的电阻接地, 接地相对地电压大于零而小于相电压, 未接地相对地电压大于相电压而小于线电压, 中性点对地电压大于零而小于相电压, 线电压保持不变, 接地电流要小一些。

单相接地故障时, 由于线电压不变, 电力用户虽能继续工作, 此时的接地电流, 可能会在接地处形成稳定或间歇性的电弧。当接地电流不大时, 接地电流过零值时电弧将自行熄灭, 接地故障将随之消失。若接地电流大于 30 A 时, 将产生稳定电弧, 此电弧的大小与接地电流成正比, 从而形成持续的电弧接地。高温的电弧可能损坏设备, 甚至导致相间短路, 尤其是在设备内部出现电弧时最危险。在接地电流小于 30 A 而大于 5~10 A 时, 由于网络中的电感和电容可能形成振荡回路, 会产生一种周期性熄灭与复燃的间歇性电弧, 导致网络出现过电压, 其幅值可达 2.53 倍的相电压, 危及绝缘。

综上所述, 可得出以下结论:

(1) 在中性点不接地系统中, 发生单相接地故障时, 由于线电压不变, 用户可继续工作, 提高了供电的可靠性。但为了防止由于接地点的电弧及其产生的过电压, 使系统由单相接地故障发展成为多相接地故障, 引起事故扩大, 持续运行时间不得超过 2 h, 并且加强监视, 在系统中必须装设交流绝缘监察装置。当系统发生单相接地故障时, 监察装置立即发出信号, 通知值班人员及时进行处理。

(2) 由于非故障相对地电压可升高到线电压, 所以在中性点不接地系统中, 电气设备和输电线路的对地绝缘必须按线电压考虑, 从而增加了投资。

当线路不长、电压不高时, 接地点的电流数值较小, 电弧一般能自行熄灭。特别是 35 kV 及以下系统中, 绝缘方面的投资增加不多, 而供电可靠性较高的优点又比较突出, 采用中性点不接地的运行方式比较适合。

目前我国中性点不接地系统的适用范围如下:

- (1) 额定电压在 500 V 以下的三相三线制系统。
- (2) 额定电压 3~10 kV 系统, 接地电流 $I_c < 30$ A。
- (3) 额定电压 20~60 kV 系统, 接地电流 $I_c < 10$ A。

(4) 与发电机有直接电气联系的 3~20 kV 系统, 如果要求发电机需带内部单相接地故障运行, 那么接地电流 $I_c < 5$ A。

1.2.3 中性点经消弧线圈接地的三相系统

中性点不接地系统, 在发生单相接地时可继续向用户供电, 供电可靠性较高, 但接地电流较大时易产生弧光接地而造成危害。为限制接地点电流, 使接地点电弧能自行熄灭, 在电源中性点与大地之间接入消弧线圈的系统, 称为中性点经消弧线圈接地系统。

消弧线圈是一个具有铁芯的可调电感线圈, 如图 1.7 所示。线圈的电阻很小, 电抗很大, 电抗值可用改变线圈的匝数来调节。消弧线圈的铁芯柱有很多间隙, 可以避免铁芯饱和, 从而可以获得比较稳定的电抗值, 使补偿电流与电压呈线性关系。为了绝缘和散热, 铁芯和线圈通常浸放在油箱内, 线圈通常有 5~9 个分接头, 用以改变线圈匝数, 调节补偿度。

消弧线圈装在系统中的发电机或变压器的中性点与大地之间, 工作情况如图 1.8 所示。

消弧线圈的阻抗很大,复导纳近似等于零,由弥尔曼定理可知正常运行时中性点对地电压等于零,消弧线圈中无电流。

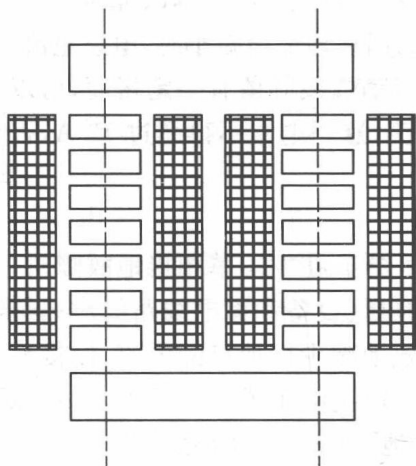


图 1.7 消弧线圈结构示意图

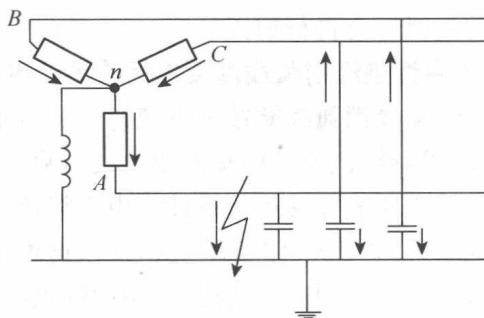


图 1.8 中性点经消弧线圈接地的三相系统

当发生单相接地时(如 A 相),中性点对地电压 $U_n = U_A$, 非故障相对地电压升高为原来的 $\sqrt{3}$ 倍,消弧线圈处于 A 相电压的作用下,在线圈中有感性电流通过,此电流经接地点形成回路,接地点的电流为接地电流与电感电流的相量和,两者反相,这称为电感电流对接地的电容电流的补偿。适当选择消弧线圈的电感量,使接地点的电流足够小,保证接地电弧自动熄灭,从而消除接地点电弧所产生的危害。

1) 消弧线圈补偿方式

根据发生单相接地故障时,消弧线圈的电感电流对接地电流的补偿程度的不同,中性点经消弧线圈接地系统有三种不同的运行方式。

(1) 完全补偿

完全补偿是使消弧线圈产生的电感电流与接地电流大小相等,接地点电流为零。从消除电弧的角度来看,这种补偿方式很理想,但在实际运行中一定要避免完全补偿方式。因为正常运行时,由于某种原因,例如线路三相对地电容不完全相等,或断路器三相触头合闸时同期性差等,在中性点与地之间会出现一定的电压。此电压作用在消弧线圈通过大地与三相对地电容构成的串联回路中,满足谐振条件,形成串联谐振,产生谐振过电压,危及系统的绝缘。所以一般不采用完全补偿方式。

(2) 欠补偿

欠补偿是使消弧线圈产生的电感电流小于接地电流,当发生单相接地故障时,接地点有容性欠补偿电流。在这种运行方式下,若部分线路因故障切除或系统频率降低时都会使接地电流减少,可能出现完全补偿的情况,满足谐振条件。因此,装在电网的变压器中性点的消弧线圈,以及具有直配线的发电机中性点的消弧线圈,一般不采用欠补偿方式。但对于单元接线的发电机中性点的消弧线圈,当变压器高压侧发生单相接地故障时,高压侧的过电压可能经过电容耦合传递至发电机侧,在发电机电压网络中出现危险过电压,使发电机中性点发生电压位移。另外,频率变化也会使发电机中性点发生电压位移。为了限制电容耦合传递过电压以及频率变化对发电机中性点位移电压的影响,宜采

用欠补偿方式。

(3) 过补偿

过补偿是使消弧线圈产生的电感电流大于接地电流,当发生单相接地故障时,接地点有容性欠补偿电流。这种补偿方式不会有上述缺点。因为当接地电流减小时,电感电流增大,不会变为完全补偿。即使将来电网发展、电容电流增大,消弧线圈留有一定裕度,可以继续使用。但由于过补偿方式在接地处有一定的过补偿电流,这一电流不得超过 10 A,否则接地处的电弧不会自行熄灭。

2) 中性点经消弧线圈接地系统的使用范围

中性点经消弧线圈接地系统与中性点不接地系统一样。在发生单相接地故障时,线电压不变,可继续供电 2 h,提高供电的可靠性。系统中的电气设备和输电线路的对地绝缘按能承受线电压的标准进行设计。由于消弧线圈能够有效地减少接地点的电流,使接地点电弧迅速熄灭,防止产生间歇电弧,所以这种接地方式广泛地应用在额定电压为 3~60 kV 的系统中。综合我国实际情况,采用中性点经消弧线圈接地方式运行的系统有:

(1) 额定电压为 3~10 kV,接地电流大于 30 A 的系统。

(2) 额定电压为 3~10 kV,直接接有发电机、高压电动机,接地电流大于 5 A 的系统。

(3) 额定电压为 35~60 kV,接地电流大于 10 A 的系统。

(4) 额定电压为 110 kV 系统,如处在雷电活动较强的山岳丘陵地区,其接地电阻不易降低,为减少因雷击等单相接地事故造成频繁跳闸的次数,提高供电可靠性,也可采用中性点经消弧线圈接地方式运行。

1.2.4 中性点直接接地的三相系统

随着电力系统输电电压的增高和输电距离的不断增大,单相接地电流亦随之增大,中性点不接地或经消弧线圈接地的运行方式已不能满足电力系统安全和经济运行的要求。克服中性点不接地系统或经消弧线圈接地系统缺点的另一种方法是中性点直接接地。

1) 中性点直接接地系统的工作原理

正常运行时三相系统对称,中性点没有电流流过。发生单相接地故障时,由于接地相直接经过地对电源构成单相短接回路,这种故障称为单相接地短路。由于故障电流很大,继电保护装置应立即动作,使断路器断开,迅速切除故障部分,防止短路电流造成更大危害。中性点直接接地时,接地电阻近似为零,中性点与地等电位。单相接地时,故障相对地电压为零,非故障相对地电压基本保持不变,仍为相电压。

2) 中性点直接接地系统的特点及适用范围

目前我国中性点直接接地的运行方式广泛应用于 110 kV 及以上系统。该运行方式的主要优点是:发生单相接地短路时,中性点的电位近似等于零,非故障相的对地电压接近于相电压,系统中电气设备和输电线路的对地绝缘按承受相电压设计,绝缘上的投资不会增加。实践证明,中性点直接接地系统的绝缘投资比中性点不接地时低 20% 左右。电压等级越高,节约投资的效益越显著。

中性点直接接地系统的缺点是:

(1) 发生单相短路时立即断开故障线路,中断对用户的供电,降低了供电的可靠性。为了克服这一缺点,目前在中性点直接接地的系统中,广泛装设自动重合闸装置。当单相接地

短路时,继电保护装置将断路器迅速断开,之后在自动重合闸装置作用下断路器自动合闸。如果单相接地故障是瞬时性的,则线路接通后恢复对用户供电;如果单相接地故障是永久性的,继电保护装置将再次将断路器断开。

(2) 单相接地短路时的短路电流很大,甚至可能超过三相短路电流的数值,必须选用较大容量的开关设备。由于单相接地电流很大,导致电网电压剧烈下降,可能破坏系统的稳定性。为了限制单相短路电流,通常只将系统中一部分变压器的中性点直接接地或经阻抗接地。

(3) 由于较大的单相短路电流只在一相回路内通过,在三相导线周围形成较强的单相磁场,对附近的通信线路产生电磁干扰。因此,电力线路必须远离信号源及通信线路,在一定距离内避免电力线路与通信线路平行架设。

1.2.5 典型电厂中性点接地方式实例分析

1) 典型电厂发电机中性点接地方式

随着发电机单机容量的不断增大,对发电机安全运行的要求也越来越高。发电机中性点接地方式的选择是涉及安全运行的重要方面。发电机中性点的接地方式,按照其发展的历程大体可划分如下:

- (1) 直接接地;
- (2) 经低阻抗接地;
- (3) 不接地或经电压互感器接地;
- (4) 经高阻接地;
- (5) 经消弧线圈接地(又称谐振接地)。

对于上述的(1)、(2)两种接地方式,若发电机定子绕组发生单相接地故障,相当于定子绕组匝间故障,故障电流往往很大,即使继电保护能够快速动作,也不能避免发电机的内部损伤。对于第(3)种接地方式,当发电机定子绕组发生单相接地故障时,间歇性的接地电弧可能引起定子绕组对地之间积累性的电压升高,威胁非故障相的定子绕组绝缘。

基于上述原因,现今世界各国的大型机组中性点接地方式多采用上述的(4)、(5)两种接地方式。其中经高阻接地方式包括:①直接经高电阻接地;②经单相或三相配电变压器(其低压侧接电阻)接地。而消弧线圈接地方式包括:①可调电感接地;②固定电感(经配电变压器加电抗器)接地。

发电机中性点接地装置的第一个作用是通过补偿电容电流(如采用消弧线圈接地),限制发电机单相接地故障电流,避免伤及定子铁芯。随着单机容量的增加,定子绕组对地电容也随之增大,相应的单相接地电容电流也增大,如果不采取有效措施,故障电流将危及定子铁芯,严重时烧损铁芯,甚至进一步扩大为相间或匝间短路等严重故障,潜在危险严重。

发电机中性点接地装置第二个作用是可以抑制间歇性接地电弧,限制可能引起的暂态过电压。间歇性的接地故障,其故障电流反复变化,必然会引起电容电流与流过中性点接地装置的电流发生波动与冲击,可能引起电容上出现很大的暂态过电压。中性点接地装置实际上给电容上的电荷提供了一个泄放回路,如果接地装置是一个阻值较小的电阻,就可以有效地抑制暂态过电压。

中性点接地装置第三个作用是可以增强保护装置对单相接地故障的检测能力,完成有