

高压发电机故障分析与 运行保护技术

Techniques of Fault Analysis, Operation and
Protective Relaying for Powerformer

林湘宁 © 著



科学出版社

高压发电机故障分析 与运行保护技术

林湘宁 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合目前国外已投入现场运行的高压发电机实际情况,全面介绍了高压发电机关键部件的设计原理、技术及运行特点等;研究了适应高压发电机特点的内部故障仿真模型,以及高压发电机在差动保护、100%定子接地保护、非全相运行保护、并列运行电机过电压保护等方面的特点和改进;研究了高压发电机运行对系统稳定性的影响和改善作用;最后介绍了高压发电机的实际运行经验和基于高压发电机绕组技术的其他新型发电设备。

本书可供从事与电力系统或电厂的科研、设计、研制、运行有关的广大科研工作者、工程技术人员和运行维护人员,以及电机、高压、电力系统等专业的高年级本科生及研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

高压发电机故障分析与运行保护技术/林湘宁著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-031825-1

I. ①高… II. ①林… III. ①高压发电机-维修 IV. ①TM310.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 135024 号

责任编辑:任加林/责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 300 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部门电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

电力工业的百年发展见证了输电电压等级不断升高的历史。这种发展依循以下基本定律：用高电压换取低电流，提高送电效率和系统稳定性。因此，大容量电能远距离传输均采用高压、超高压甚至特高压电网。然而，由于绝缘问题制约，发电侧的输出电压却一般维持在 20kV 以下。为了实现发电侧与输电网的顺利对接，需要借助升压变压器。作为新型发电形式的探索，高压发电机（Power-former）在 1998 年问世。这种新型高压发电机引起了电力工程诸多领域专家的高度兴趣。随着 21 世纪对电力系统效率、稳定性尤其是对环境保护要求的提高，这种新型发电机具有相当广阔的应用前景。因为电力系统所需要的无功主要由发电机供给，高压发电机具有比传统发电机更强的过负荷能力，这意味着和传统发电机相比，高压发电机能够提供更长时间的无功支持，从而可以增强系统的电压稳定性。此外，高压发电机固有的高压侧电压控制能力也对系统电压稳定性具有改善作用。另一方面，高压发电机在设计上的过负荷特性使其具有较常规发电机更强的无功调节能力，而高压发电机直连于高压母线的特点又使其具有天然的高压侧电压控制能力。高压发电机的保护和相关系统稳定问题研究，是目前几乎没有报道的保护和控制领域最新研究方向，一旦大规模应用，其相关的故障分析、运行与保护的研究也将会成为一个刻不容缓的课题。该领域的研究必将对很有发展前途的高压发电机发电技术在电力系统中的普及和推广起到重要的推动作用。

2002 年，作者成为高压发电机继电保护与控制系统的项目组核心成员。该项目是英国 ALSTOM 输配电公司和瑞典 ALSTOM 发电公司共同发起的世界上首个面向高压发电机二次系统的联合攻关项目。作者在其中参与了两项保护新原理的研究，完成了整个保护系统的软件设计、编制和所有的仿真实验。该项目于 2003 年 8 月完成，系统在瑞典 Porjus 水电站投入试运行迄今已稳定运行 8 年。以这段研究经历为工作基础，作者于 2004 年申报的国家自然科学基金面上项目获得批准。依托该研究项目，作者将继电保护技术、新型发电技术、稳定控制技术有机地结合起来，从而尝试探索电气工程各研究分支的交叉与融合。将这段时间以来的工作加以总结出版，是希望将这方面的工作介绍给同行，以引起更多从事电机设计和电力系统运行从业者的兴趣。

本书结合目前国外已投入现场运行的高压发电机实际情况，全面介绍了高压

发电机关键部件的设计原理、技术特点、运行特点、投资及运行经济效益分析、应用前景。在发电机故障分析方面,研究了适应高压发电机特点的基于定子绕组分割的内部故障仿真模型,结合适当的动态仿真数值算法,开展了全面的故障分析,得到了有借鉴意义的结论。同时,对双定子绕组的高压发电机的运行和故障仿真也进行了相关研究。在高压发电机保护方面,研究了基于定子电容电流自适应补偿的差动保护、基于零序复合功率的100%定子接地保护、结合零序电压和负序电流综合判断的非全相运行保护、并列运行高压发电机的过电压保护等。在高压发电机的运行控制方面,基于新型耦合节点组算法研究了高压发电机运行对系统电压稳定性的影响,研究了高压发电机电压控制对改善电力系统角度稳定性的作用等。本书最后,介绍了高压发电机的实际运行经验,以及从高压发电机设计中提炼的共性技术应用于其他新型发电设备的展望。

本书的出版得到三峡大学楚天学者计划的资助。在成书的过程中,作者课题组的田庆博士、高艳博士做出了卓有成效的工作,李兴东同学做了大量的编辑整理工作,在此一并深表感谢!

目 录

前言

第一章 高压发电机简介以及基本参数	1
1.1 引言	1
1.2 传统发变组发电方式及其与高压发电机发电方式的对比	2
1.3 高压发电机的设计和运行特点	5
1.3.1 高压发电机绕组设计特点	5
1.3.2 高压发电机的定子结构设计特点	7
1.3.3 高压发电机冷却系统设计特点	8
1.3.4 高压发电机对系统侧的支持	10
1.3.5 高压发电机运行实现更高的经济效益	11
1.3.6 高压发电机的不足及其研究热点	12
第二章 高压发电机故障分析与仿真技术	14
2.1 引言	14
2.2 发电机绕组电气故障分析	14
2.3 发电机定子绕组内部故障分析方法	15
2.4 高压发电机定子绕组分割技术	16
2.4.1 简介	16
2.4.2 外子绕组分割方法	17
2.4.3 内子绕组分割方法	19
2.4.4 分割后子绕组电感的自感和互感	19
2.4.5 分割方法的验证	20
2.4.6 举例计算	21
2.5 建立高压发电机定子绕组内部故障模型的必要性	22
2.5.1 高压发电机定子绕组内部单相接地短路	23
2.5.2 内部两相接地短路	26
2.5.3 高压发电机定子绕组内部相间故障模型	28
2.6 动态仿真的数值方法	29
2.6.1 刚性系统求解的实质	30
2.6.2 仿真的数值方法	32
2.6.3 数值算法试验	35
2.7 高压发电机定子绕组内部故障仿真实例	39

2.7.1 仿真程序的实现	40
2.7.2 内部故障仿真	41
2.8 高压发电机稳态和外部故障时的双绕组仿真模型	47
2.8.1 正常运行时的模型	48
2.8.2 端口约束条件	53
2.8.3 仿真结果	55
2.9 小结	57
第三章 高压发电机定子电容电流自适应补偿差动保护方案	58
3.1 引言	58
3.2 传统纵联差动保护运用于高压发电机时的不足	58
3.2.1 电容电流对差动保护的影响	58
3.2.2 基于稳态量补偿的高压线路差动保护	59
3.3 高压发电机的补偿式电流差动保护	60
3.3.1 补偿的基本思路	60
3.3.2 电容电流补偿式差动保护的基本判据	61
3.3.3 高压发电机电缆电容电流等效计算电路	62
3.3.4 自适应补偿式差动保护判据	70
3.3.5 仿真试验验证	71
3.4 小结	76
第四章 高压发电机定子单相接地保护	77
4.1 引言	77
4.2 传统发电机定子绕组单相接地保护方案	78
4.2.1 基波零序电压型定子接地保护	78
4.2.2 3次谐波电压型定子接地保护	79
4.2.3 外加电源式定子接地保护	80
4.2.4 ALSTOM的100%定子接地保护方案	81
4.3 高压发电机定子单相接地保护新原理	83
4.3.1 零序复合功率	83
4.3.2 新型保护方案的原理	85
4.4 仿真试验验证	89
4.5 小结	95
第五章 高压发电机非全相运行保护	97
5.1 引言	97
5.2 传统发电机非全相保护分析	98
5.2.1 传统发电机组非全相运行的分类与导致事故的原因	98

5.2.2	传统发电机组非全相运行研究现状	99
5.2.3	传统发电机非全相运行实例介绍	99
5.2.4	ALSTOM 的断路器失灵保护的方案	100
5.3	高压发电机非全相运行状态分析	102
5.3.1	系统模型	102
5.3.2	非全相运行时的故障特性	103
5.4	基于机端零序电压和定子绕组负序电流的高压发电机非全相保护 方案	103
5.5	仿真试验验证	104
5.5.1	系统两相运行时的仿真	104
5.5.2	系统单相运行时的仿真（断路器单相粘连）	106
5.6	小结	108
第六章	用于多台电机并联运行于同一母线的高压发电机过电压保护	109
6.1	引言	109
6.2	传统发电机过电压保护	109
6.3	高压发电机过电压分析	112
6.4	ALSTOM 并列运行电机保护的方案	113
6.5	基于无功功率变化的高压发电机过电压保护方案	116
6.6	仿真试验验证	117
6.7	小结	125
第七章	高压发电机电压控制改善电力系统角度稳定性的研究	127
7.1	引言	127
7.2	电力系统稳定性的基本概念	128
7.3	传统发电机高压侧电压控制	129
7.3.1	HSVC 及其原理	129
7.3.2	HSVC 的理论特性	130
7.3.3	传统发电机 HSVC 对功角稳定性的影响	131
7.4	高压发电机机端电压控制	133
7.4.1	高压发电机机端电压控制对稳定性的影响	133
7.4.2	高压发电机机端电压控制对阻尼力矩的影响	135
7.5	仿真验证	136
7.5.1	单机-无穷大系统仿真	136
7.5.2	修正的 EPRI-7 节点系统仿真	146
7.6	小结	148

第八章 高压发电机对电压稳定的影响	150
8.1 背景简介	150
8.2 电力系统电压失稳现象	151
8.3 电压稳定性的定义及分析方法	152
8.3.1 电压稳定性的定义与分类	153
8.3.2 复杂系统电压稳定性分析的数学模型	154
8.3.3 复杂系统的电压稳定分析方法	155
8.4 新型耦合节点组算法	157
8.4.1 新型耦合节点组算法	158
8.4.2 北欧测试系统	162
8.5 高压发电机替代常规发变组对节点负荷极限的影响	166
8.6 高压发电机高压侧控制对提高系统电压稳定性的作用	168
8.6.1 仿真系统	168
8.6.2 仿真分析	169
8.7 小结	177
第九章 高压发电机的实际运行经验及其他新型发电设备	178
9.1 高压发电机的实际运行经验	178
9.2 高压发电机在 Porjus 水电站的运行简介	178
9.3 Eskilstuna 电站运行实例	180
9.4 Porsi 运行实例	181
9.5 Höljebro 运行实例	181
9.6 高压发电机将来的发展方向	182
9.6.1 增加耐压等级, 提高机组容量	182
9.6.2 高压电缆绕组技术在其他领域上的应用	183
9.7 新型高压风力发电机 Windformer	183
9.7.1 Windformer 系统组成	184
9.7.2 Windformer 的主要技术	185
9.7.3 新型与传统风力发电机所需设备对比	187
9.7.4 新型风力发电系统的特点	188
9.7.5 新型风力发电系统的运行情况	188
9.7.6 Windformer 小结	189
9.8 新型电力变压器 Dryformer	189
9.8.1 Dryformer 简介	191
9.8.2 技术上的特点	193

9.8.3 产品设计上的优势	194
9.8.4 产品生产上的优势	195
9.9 高压电动机 Motorformer	195
9.9.1 结构与设计的	196
9.9.2 Motorformer 的优势	197
9.10 小结	197
附录 A 高压发电机内部故障仿真绕组参数计算公式	198
附录 B 北欧测试系统数据	200
参考文献	204

第一章 高压发电机简介以及基本参数

1.1 引言

电力工业的百年发展见证了输电电压等级不断升高的历史。这种发展主要依据以下的基本定律：在传送功率时，用高电压换取低电流，以减少功率传送时的铜耗，提高送电效率。因此，大功率远距离传送的载体均采用高压、超高压甚至特高压电网。现在，投入商业运行的特高压电网电压等级已经达到了 1000kV 以上。同时，一个现实也存续了将近百年：由于绝缘问题的制约，发电侧的输出电压一般维持在 20kV 以下，为了实现发电侧与输电网的顺利对接，需要借助升压变压器。变压器作为发送配电联系枢纽的地位似乎天经地义，发电机—升压变—输电网—降压变—负荷，这一经典发送配电模式存在的合理性和必然性也似乎是毋庸置疑的。然而，进入 20 世纪 90 年代以来，这个概念受到了有力的挑战。ABB 发电公司的 Mats Leijon 博士等人历经 8 年，研发了一种利用高压电缆绕制定子绕组的高压发电机，从而实现了发电单元与高压输电网的直联，这种集发电和变电功能于一身的发电机被命名为高压发电机（Powerformer），这项技术在 2001 年召开的 IEEE 电力工程大会上被与会的众多专家誉为“21 世纪的发电技术”。在包括国际大电网会议在内的多个学术场合，电力工程领域的多位专家均曾经表示：高压发电机代表了 21 世纪电力新技术发展的一个重要方向，具有广泛的应用前景。

实际上，将发电机直接连到输电网的想法并不新鲜。自 20 世纪初以来，人们一直在尝试制造出不使用升压变压器就可以直接并入电网运行的高电压发电机。早在 1905 年，意大利的梅格里尼教授和冈兹公司的工程师们经过努力，在意大利的苏比阿科水电站投产 2 台三相 30kV、5.2MVA、450rpm^①、45Hz 的发电机，电力经 55km 线路送往罗马。1928 年，英国的教区牧师帕森斯爵士采用圆形断面的线棒设计定子绕组，并将其在发电机定子槽内进行恰当的布置，使得绝缘系统的耐压水平提高了 3 倍，制造了 1 台 25MVA、33kV、3000rpm 的汽轮发电机。1928~1953 年间，帕森斯爵士共制造了 88 台直接并入输电网的高压发电

^① 1rpm=1r/min。

机，总容量 3434MVA。然而，发电机机端电压的提升明显滞后于输电网电压提高的速度，因此，高压直联发电机的发展让位于“发电机+升压变”的发电机组模式。在工程应用上，后者占据了绝对统治地位，而高压直联发电机中蕴含的巧妙构想却被忽视和搁置了 40 余年。

所幸电力工业已经在发展和变革中迈入了 21 世纪，这是一个新技术革命层出不穷的时代。基础科学的发展成为推动工程学科技术进步的强大动力，电力工业也同样得益于此。近年来，材料科学在分子聚合物研究领域的成果已广泛应用于电力行业，主要体现在用于超高压输电的电缆技术上。现有电缆有两大类：液体浸渍纸电缆和挤出聚合物电缆。后者先从热塑性聚乙烯开始，但很快就被交联聚乙烯（XLPE）取代，并在行业中占据了主导地位。XLPE 电缆由绞合的圆形导体组成，并挤包内半导电屏蔽层，接着是固体绝缘层 XLPE 和外半导电层。半导电层由混有炭黑或金属微粒的高分子材料组成，其代表是 XLPE 或乙烯丙烯橡胶。由于外半导电层接地，电场完全局限在绝缘层内。基于这种新型绝缘材料的高压电缆已经广泛应用于超高压输电网的建设，取得了丰富的运行经验。在此基础上提出的崭新绕组设计概念使得高压发电机的发明成为可能。这种新型发电机从原理到运行都具有鲜明的特点。

1.2 传统发变组发电方式及其与 高压发电机发电方式的对比

在电力系统中，几乎所有的发电机，如汽轮发电机组、水轮发电机、核能发电机、蒸汽发电机及非常新的太阳能发电机都属于同步发电机。和其他电机一样，同步发电机工作状态是可逆的，即电机既可以工作在发电机状态，又可工作在电动机状态，还同时可以用作无功补偿机，但是主要还是做发电机使用。

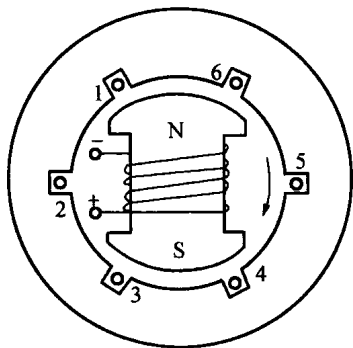


图 1-1 同步发电机基本结构
1~6 为定子绕组；N、S 分别为
转子的南北磁极

同步发电机是利用电磁感应原理将机械能转换成电能的设备，其基本结构如图 1-1 所示。

改进同步发电机的冷却技术是提高其线负荷的一种有较大潜力的方法。主要的冷却方式、技术及其简单比较如下：

1) 全氢冷。定子和转子绕组用氢表面以上冷却或内冷，定子铁芯采用氢冷。通常 200MW 以下机组的定、转子都采用氢内冷。

2) 水氢氢。定子绕组采用水内冷，转子绕

组采用氢内冷，定子铁芯采用氢冷，其单机容量可达 1200MVA，大型发电机广泛采用这种冷却方式。

3) 水水空。定子和转子绕组采用水内冷，定子铁芯采用空气冷却，又称双水内冷。采用该冷却方式的发电机最大单机容量已达 600MVA。

4) 水水氢。定子和转子绕组采用水内冷，定子铁芯采用氢冷。采用该冷却方式的发电机最大单机容量已达 1700MVA。

5) 全水冷。定子和转子绕组以及定子铁芯均采用水冷，目前采用该冷却方式的发电机最大单机容量已达 1200MVA。

(1) 传统发电机变压器组中性点接地方式

发电机变压器组中性点接地方式对于系统的潮流计算及系统的拓扑结构均有重要影响。发电机变压器组中性点接地方式主要有以下几种：

1) 直接（或有效）接地：变压器中性点直接接地方式广为使用，其特点是接地故障电流大，某些情况下超过三相短路电流值。若接地故障电流超限需降低时，可以采用其他方法控制其电流幅值。

2) 中性点经电阻接地（低电阻）：这种接地方式的接地故障电流大大低于三相短路故障电流。在发生接地故障时，中性点发生位移，因此变压器绕组采用分级绝缘。

3) 中性点经电抗器接地：通常，中性点电抗器选择的接地故障电流限值不低于三相短路故障电流的 25%，以使接地故障时的暂态过电压值最小。电抗器零序电抗与正序电抗的比值应在 10 倍以下。

4) 中性点经隔离开关直接接地：法国电力公司（EDF）在电网中广泛地采用这种接地方式。

5) 中性点经接地故障消除器接地：这种接地方式的做法是，变压器中性点经配电变压器（二次侧并接电抗器）接地。在单相接地故障时电弧不能维持，以限制接地故障电流。

6) 不接地：变压器中性点不接地，变压器采用全绝缘。

(2) 传统发电机变压器组继电保护

在现代电力系统中，发电机组单机容量越来越大，设备配置也越来越复杂，在电力系统中占有极其重要的位置，同时也给电力系统及机组自身的安全稳定运行带来一系列新问题。对于传统的发电机变压器组，继电保护的理论和实践已经相当成熟。但是，目前的机组保护还存在以下几个主要问题：①机组内部轻微故障保护灵敏度低；②匝间保护误动率高；③差动保护 TA 特性不一致及饱和问题未能解决；④大机组内部故障保护方案不尽完善。总体来讲，发变组保护正确动作率偏低。理论上讲，快速切除故障可减小故障元件的损坏程度，缩小故障范

围,提高系统运行的稳定性。特别是对大机组保护而言,保护的速动性要求更高。

大机组对保护速动性要求高主要基于以下考虑:①机组有效材料利用率高,造成其热容量降低,从而使发电机组对短路电流及过负荷的承受能力大幅度降低;②故障瞬间短路电流很高,电流互感器的暂态磁通也随之大幅度增加,使铁芯趋于饱和,恶化传变,延缓了保护动作和降低保护灵敏度,导致保护不能正确动作;③大机组在系统中的地位重要,造价昂贵,设备复杂,故障检修难度大、周期长,直接及间接损失严重。有关资料表明,当机端发生两相短路时,为了不损坏发电机,要求在几百 ms 内切除故障;当升压变压器高压侧发生短路故障时,为满足系统稳定方面的要求,切除故障的时间应小于 0.1s,除去断路器的跳闸时间,要求保护的动作时间最多仅为 30~50ms。

(3) 传统发电机变压器组的特殊运行方式

传统的发电机变压器组还存在着一种特殊的运行方式——非全相运行方式。按发变组非全相运行的相数可分为单相非全相运行和两相非全相运行。按导致发变组非全相运行的原因可分为系统电气故障非全相运行及开关(断路器)失灵非全相运行。系统电气故障非全相运行可分为不对称短路非全相运行和断线非全相运行,开关失灵非全相运行可分为跳闸非全相运行及合闸非全相运行;开关跳闸失灵的的非全相运行又可分为发变组单相非全相运行及两相非全相运行。发变组,特别是大容量的发变组,保护配置比较齐全,系统电气故障都能较快切除,由此引起的非全相运行持续时间很短,负序电流强度在发电机承受能力的范围之内,对发电机的危害不大,而开关失灵引起的发变组非全相运行,持续时间一般较长,对发电机危害也较严重。

此外,在传统的发电机变压器组中,还存在发电机与电网参数配合的问题:随着我国电力系统的迅速发展,互联电网规模不断扩大,电网联系越来越紧密,电网短路电流水平也不断增大。其中,华东电网暴露出短路电流超标状况最为严重,部分 500kV 厂站短路电流超过了 70kA。目前,提高升压变短路阻抗来降低机组注入系统短路电流的方法已经开始采用,并带来了一定的效果。但提高短路阻抗的同时也会增加升压变的无功损耗,降低系统的动态无功备用。为了保证系统的安全、稳定运行,既要关注如何控制电网短路电流和保持系统充足的动态无功备用,又要考虑电源侧设备的可靠性和经济性,因此合理选用设备参数是迫切需要解决的问题。

槽内气隙放电和出槽口的绕组电晕放电是传统电机绕组设计时需要回避的难题,高压发电机采用电缆进行绕组设计,有效地规避了上述问题。高压发电机的机端电压可以设计得很高,理论上可以仅由 XLPE 电缆的耐压水平决定,高电压

下运行可以避免定子电流过大而引起的一系列麻烦，如冷却问题、绕组振动和焊接困难等问题。每根电缆长约 100m，用标准的电缆接头连接。同时电缆的电场分布均匀，符合 Maxwell 定律。因此，高压发电机的机端电压相对于传统的发电机可以得到很大幅度的提升。当机端电压达到一定时，可以不需要升压变压器，而直接可以将机端接在系统母线上。

在同样的额定容量下，由于高压发电机在很大程度上提高了发电机的机端电压，降低了输出电流，发电机定子温升可大幅度降低。同时，由于电缆绕组不会出现槽内气隙和出槽口的放电现象，可大幅降低发电机绝缘设计的成本。

高压发电机发电方式和传统发变组发电方式的对比归纳如表 1-1 所示。

表 1-1 高压发电机发电方式和传统发变组发电方式的对比

高压发电机发电方式	传统发电机-变压器组发电方式
机端电压高	机端电压低
输出电流小	输出电流大
无局部放电现象	有局部放电现象
发电机温升小	发电机温升大
不需要升压变压器	需要升压变压器

1.3 高压发电机的设计和运行特点

1.3.1 高压发电机绕组设计特点

传统发电机中的定子绕组由使用云母带、环氧或聚酯树脂浸渍的矩形截面导线棒绕制而成，其工作场强仅为 2.5~3kV/mm。对使用云母带的绝缘系统来说，最重要的是在制造过程中要保持绝缘系统无空隙。但是，机械应力和热循环会导致空隙的形成，随着电压的增高，绝缘内必定会出现局部放电。传统定子线圈截面是长方形的，导致导体表面的电场不均匀，转角处的电场强度高。在绕组端部区域，必须采取复杂措施以控制电场强度，避免发生局部放电和电晕。传统发电机的这种设计原则使其输出电压不能超过 30~35kV。

相比而言，高压发电机采用整根具有坚固绝缘的圆形 XLPE 电缆绕制其电枢绕组，中间没有接头。绕组绕组的电缆是由导体、内半导体层、绝缘层和外半导体层组成，如图 1-2 所示。此设计的好处包括：

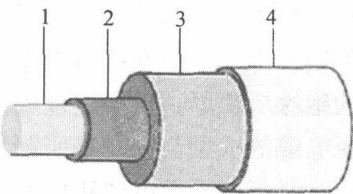


图 1-2 高压发电机绕组电缆
1. 导体；2. 内半导体层；
3. XLPE 绝缘；4. 外半导体层

- 1) 端部线圈中的电场无需控制, 绕组设计时的电场控制得到简化;
- 2) 有效地规避了常规发电机绕组设计时可能出现的局部放电或者电晕放电的风险;
- 3) 运行维护人员的安全得到了保证, 因为绕组的端部区域在地电位工作。

根据 Maxwell 电磁场方程, 圆形导体产生的电场均匀分布。高压发电机由于发电机所用的导体暴露在与电力电缆高得多的磁场环境中, 为了减少由于漏磁通造成的如涡流损耗等额外损失, 将导体细分为彼此绝缘的多股导线是很有必要的。

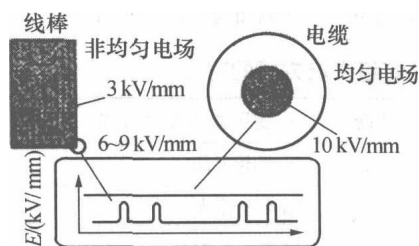


图 1-3 高压发电机电缆和常规矩形导体的场强分布对比情况示意图

圆形导体和矩形导体的电场分布对比如图 1-3 所示。从图中可见, 矩形导体周围的电场分布并不均匀, 在矩形的拐角处, 电场强度相对较高, 而对于边侧, 其电场强度相对较低。与之形成对比, 圆形导体周围的电场分布均匀。根据电缆的设计, 外半导体层将电场限制在绝缘介质 (固体电介质) 内部, 则末端绕组区的电场强度不需要刻意控制, 因为通过这样的设计已经消除了电晕和

放电的危险。根据 CAD 技术分析, 圆形电缆较传统电机电枢绕组所用的成型矩形线棒具有损耗及电动力小等特点。为了维持线匝外皮在地电位, 电缆外层需要具备一定的导电性。

电枢绕组为多层同心绕组, 从里到外电位逐匝递增。因此, 高压发电机定子绕组电缆的绝缘采用的是分级绝缘, 这是因为发电机中的感应电压从定子绕组的中性点到线末端逐渐增加, 使得电缆沿着绕组方向产生不同的电应力, 即定子绕组中各匝绕组对地电位并不相同, 设计者采用三种不同尺寸的电缆绕制定子绕组, 靠近转子处的定子铁芯的圆形槽直径较小, 此处使用绝缘层较薄的电缆; 远离转子处的直径较大的圆形槽中使用绝缘层较厚的电缆。该设计的初衷是尽可能地减小定子的体积, 减少定子的耗材和运行时的铁耗。通过这样的设计, 理论上高压发电机的机端电压由 XLPE 电缆的耐压水平唯一决定。为了连接到更高电压等级的电网, 绕制高压发电机绕组的电缆额定电压需要设计得更高。但是, 电缆的绝缘层变厚, 使得电缆成型、绕组安装和槽内固定都变得相当困难。因此, 高压电缆的成型与固定是研制和推广高压发电机必须着重解决的课题。

所有高压发电机所用的电缆和和电缆接头及终端等附件都需要根据统一标准进行常规测试。为了保证处理绕组时不损伤电缆, 在进行电缆连接之前, 对每个电压等级都要开展高压测试工作。XLPE 电缆的高压测试技术也是高压发电机研究

需要重点关注的问题。

1.3.2 高压发电机的定子结构设计特点

高压发电机同样适用于传统发电机的转子结构，因此在高压发电机中只有跟电机定子结构相关的设计需要改进。

为了使发电机获得高电压输出，电枢铁芯的槽形开得很深，以保证每槽中能够安放足够的电缆匝数。高压发电机的定子由叠装钢片组成的层叠铁芯组成，定子槽的齿由外向内指向电机的转子。为适应绕组绝缘厚度逐匝递增的需要，槽形由多个直径逐个递增的圆相串而成，每个圆中安放一根电缆，这样齿的宽度由里到外基本相等，使其中的磁场强度保持均匀，降低了齿中的损耗。高压发电机定子的剖视图及定子槽的温度分布如图 1-4 所示。

对旋转电机的设计进行优化时，设计磁路的槽和齿是其中非常关键的步骤。对于像高压发电机这样的高压发电机，串联绕组匝数更多，需要有很深的槽。同时，应当将槽齿设计得尽可能宽，以降低电机内部的励磁量和损耗。对电缆线圈而言，靠近转子侧部分不需要很厚的绝缘层，因此向着转子方向槽的横截面可以设计得较小；而对于远离转子的电缆线圈，其所需的绝缘层比较厚，在背着转子方向，槽的横截面应当设计得较大。

事实上，高压发电机绕组由大量不同尺寸的电缆绕制而成，绕组加工中的处理能力决定了每根电缆所能达到的最大长度，而电缆接头的数目则取决于每根电缆的长度。用成型的高压 XLPE 电缆制作定子绕组，同时在电缆和槽壁之间插入一个三角形硅橡胶管，以保证电缆的固定。每个槽里相隔一定距离就有一个圆形孔，两圆孔之间形成窄的腰，像车链条，并且固定电缆的一侧圆弧较小，造成其定子结构与传统发电机明显不同。特殊的定子槽形及采用多层同心式绕组，使得高压发电机端部结构也比传统发电机复杂。

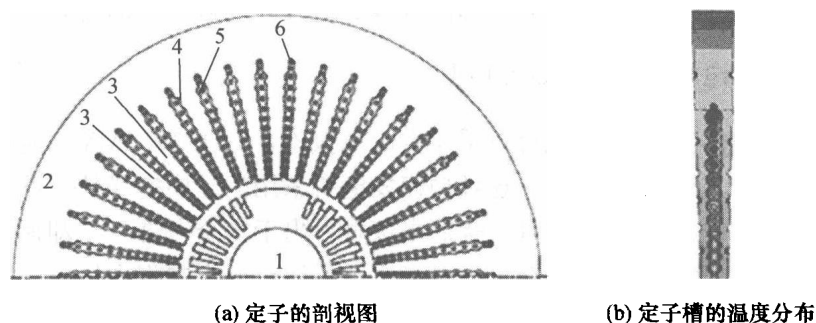


图 1-4 高压发电机定子设计

1. 转子；2. 定子剖面；3. 齿；4. 主绕组电缆；5. 主绕组电缆；6. 辅助绕组