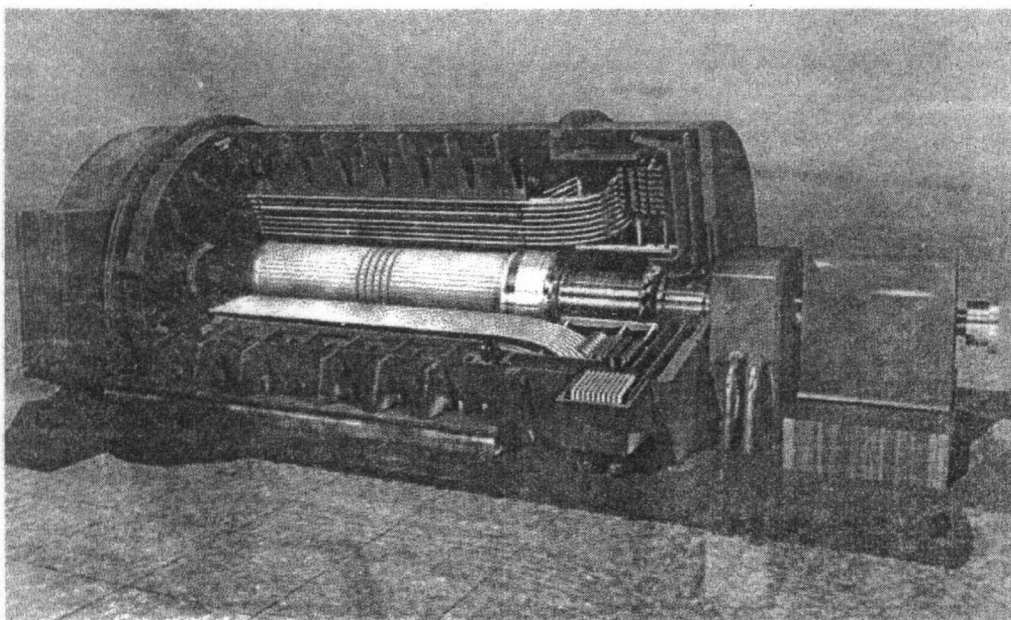


超高压电机文集



哈尔滨电机厂有限责任公司

二〇〇四年三月

序

孙玉田 博士

(哈尔滨大电机研究所)

在工业技术飞速发展的时代, 摆在一个技术领先公司面前的挑战总是基于一个共同的前提, 就是要占领商品市场, 获得竞争的主动权。这就需要采用世界先进的生产工艺、信息系统和公司资产的优化管理去实现。在此基础上, 获得企业生存和持久发展的必由之路就是孜孜不倦, 加大科研投入, 由此而能取得用户的信任, 并不断地开发出一流的产品。

1998年2月25日, ABB公司(ABB公司发电设备部于2000年后和ALSTOM公司合并)在第37届国际大电网会议上, 首先发表论文, 介绍他们研制出的世界上第一台采用交联聚乙烯绝缘电缆(XLPE)绕制成定子绕组的全新型超高压发电机, 商业注册冠名为Powerformer。该机组安装在瑞典的Porjus水电站并直接并网发电。Powerformer取消了发电机出口开关、封闭母线和升压变压器、可直接并网使整个系统得到简化, 减少了工作量, 使系统效率提高了2%, 电站总投资可节省约10%左右。而整个系统的简化又极大地提高了机组运行的可靠性。Powerformer的成功研制, 是电机制造史上的一次重大革新, 在电工行业有着深远的影响。

早期人们曾进行了能与电网直接相连的超高压发电机的研究, 但受材料科学的发展限制, 始终没能走出传统电机结构设计和传统绝缘系统的框架。在20世纪的前80年中, 发电机的额定电压不曾超过30 kV, 而电网电压却迅速提高, 已达到500 kV, 这就给从事发电事业的人们再次提出了新的课题, 如何提高发电机的端口电压使之直接并网, 这样既减少系统的复杂性, 同时也改善电机的发热和通风要求, 最后使整个电力系统的可靠性得到提高, 发电机的使用寿命得到保证。

ABB公司在上个世纪于90年代初就组织力量, 开展了对超高压电机的科研与开发工作。从高压输电电缆得到启发, 将输电电缆技术融入发电机结构的设计之中, 经过8年的努力, 获得了巨大成功。之后, 他们又用了约两年的时间, 把Powerformer原理推广到风力发电机、电动机和变压器制造技术上, 研制出称为Windformer、Motorformer的新型电机和Dryformer变压器。这样, 将

他们的科研成果全面铺开，以全新的技术占领市场，提高了声誉并取得了巨大经济效益。

ABB 公司十分重视把科研成果和产品技术相结合在一起，Powerformer 就是一例。其发电设备制造部门有很多重大的创新产品，例如：在上个世纪 60 年代，该公司就首先在大型汽轮发电机上采用了组合转子结构；在 70 年代又推出极具代表性的水轮发电机支架斜支臂结构（又称斜元件结构），这种结构一直沿用到我国三峡水轮发电机上。现在他们又研制出了 Powerformer，这些都是科研和生产相结合的范例。与此同时，还引入了新的设计理念，对产品进行寿命周期评估，从中把环保意识引入电机设计的自始至终，从产品材料的选择到产品的制造和使用以及在产品报废后的再利用，把减少产品对环境的影响放在很重要的地位。

ABB 公司有着雄厚的科研队伍，他们可按用户的要求进行各项设计并实现其应用方案。正是有着这样庞大的科技队伍，才能有所创新！而创新的成果又都在产品上得以实现，成为世界一流的集团公司。

ABB 公司的发展与创新给我们提供了直观的实例。目前，我公司拥有的科研队伍在国内同行业中仍居首位，如何发挥我们的整体力量，把我们的各项科研成果切实的和我们的产品结合起来，并开发出具有高科技含量的有代表性的产品，正是我们努力的方向。我们不但要让国内的用户对我们满意，更应让国外的用户和生产厂商对我们的产品认可，让他们来购买我们的技术和产品！

本文集旨在把 ABB 公司的这一新科研成果—Powerformer 介绍给国内的同行，并把我们能收集到的资料整理并翻译成册，供感兴趣的同行们参阅。

在翻译过程中，我们对 Powerformer 一词做了进一步的推敲。Powerformer 把发电机和变压器的功能合为一体，正如有关文章所说的，它是一个系统，仅用一个中文词来反映它的全貌是较困难的。可把它试译成：功率转换器或电力发生器，也可译成：超高压发电机。经商讨，最后定为超高压发电机。

目前，国内超高压发电机方面的基础科研工作也在起步，哈尔滨理工大学等单位开展了一些科研工作，我们希望本文集能对 Powerformer 的推广起一定作用。

由于时间紧，能收集到的 ABB 方面公开发表的文章是有限，且这是项新技术，原文用词也都不统一，故译文肯定会有不足之处，敬请读者谅解。

目 次

超高压发电机 (Powerformer) 的诞生预示电机结构的一场革命.....	戴庆忠 (1)
关于超高压发电机-Powerformer.....	沈梁伟 (5)
Powerformer 定子槽漏抗计算.....	周垂有 戈宝军 (11)
超高压发电机空载电势波形的分析	王志敏 戈宝军 (18)
突破传统的电站	(瑞典) M.Leijon 等 (23)
超高压发电机-Powerformer 21 世纪的电力发电.....	(瑞典) Mats.Kjellberg (36)
改善电站总体经济效益的全新型发电机 Powerformer.....	(瑞典) M.Leijon (48)
Powerformer 的应用报告.....	(瑞典) Sture Lindahl (55)
首次投入商用的汽轮发电机-Powerformer	(瑞典) Stellan Thoren 等 (77)
瑞典热电厂的 Powerformer.....	(瑞典) Lars Andersson 等 (89)
一种可直接和高压电网连接的新型电动机 Motorformer.....	(瑞典) Göran Eriksson (96)
Windformer 向大容量发展的风力发电	(瑞典) Mikael Dahlgren 等 (101)
运行四年的 Powerformer	(杂志) Modern Power System (109)
Dryformer——一种全新的无油电力变压器	(瑞典) Thomas Andersson 等 (116)
以 Powerformer 为例, 对产品算一笔生态账.....	(瑞典) Anne-Marie Imrell (120)

超高压发电机 (Powerformer) 的诞生 预示电机结构的一场革命

戴庆忠

众所周知,发电机发出的电要经过升压变压器后才与高压电网相连接,而高压电网又需要用降压变压器才能向电动机供电。形成这一现象的根本原因是输电电压很高,而电机电压较低,也就是说,由于绝缘水平的限制,人们无法制造能与电网直接相连的电机,这也使人们对这种发电-输电-供电系统习以为常,认为是顺理成章的事。

但是,很早以来就有人想研究一种与电网直接相连的超高压发电机。早在 1905 年,门加里尼 (Mengarini) 教授和匈牙利冈茨 (Ganz) 工厂的工程师一起,对意大利 Subjaco 水电站的两台 30 kW, 5.2 MVA, 450 r/min (45 Hz) 的水轮发电机进行了研究; 1928 年,帕森斯 (C.A.Parsons) 和罗森 (J.Rosen) 研制出一台直接与电网相连的 25 MVA, 33 kV, 3000r/min 的汽轮发电机。1932 年 BBC 公司为比利时提供了一台 36 kV 的汽轮发电机 (以后曾制造过多台)。但是,由于他们都是在传统电机结构和传统绝缘系统上下功夫,故进展不大,效果不显著,而与此同时的电网电压却迅速提高。所以,从 20 世纪 50 年代以后,使得这种探索很难再进行下去。目前,发电机的额定电压均不超过 30 kV。

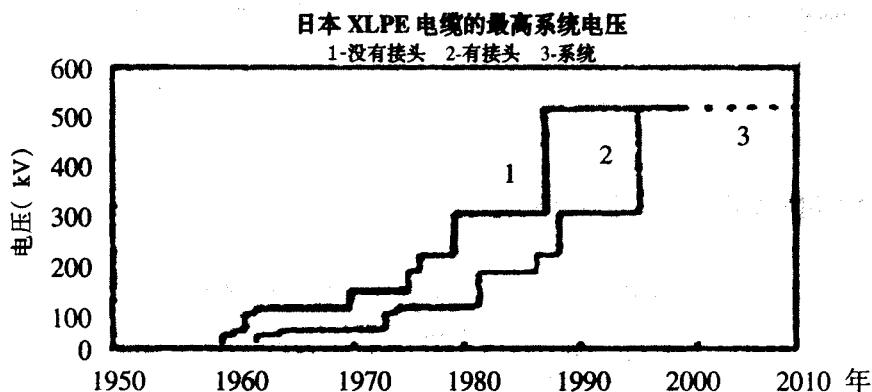


图1 日本 XLPE 输电电缆电压的增长

1990 年,原 ABB 公司瑞典分部悄然开始进行与电网直接相连的超高压发电机的研究。他们摒弃传统电机的绕组及其绝缘结构,从高压输电用交联聚乙烯 (XLPE) 电缆的电压提

高而获得灵感（图 1），将输电电缆溶入发电机结构之中。经过 8 年的不懈努力，1998 年 2 月 25 日，他们对外宣布，世界上第一台采用交联聚乙烯（XLPE）电缆绕制定子绕组的超高压发电机（被定名为：Powerformer）在瑞典 Porjus 水电站直接并网运行。2000 年初，阿尔斯通（Alstom）公司合并到 ABB 公司后，继续支持 Powerformer 的开发与研制工作。当年，Alstom 公司为瑞典 Eskilstuna 热电站制成一台 42 MVA, 136 kV 的 Powerformer。2001 年 Alstom 公司又在瑞典的两个水电站投运了两台 Powerformer，并为日本的某电站和加拿大 Miller Creek 水电站分别制造了一台 Powerformer。

受第一台 Powerformer 成功运行的鼓舞，采用这种结构原理的第一批风力发电用超高压发电机（Windformer）于 2001 年在瑞典的 Näsudden 风电场诞生，每台机为 3 MW，电压高于 20 kV；第一批直接与电网相连的超高压电动机（Motorformer）也已投运，其容量范围为 1000 kW 至 5000 kW，额定电压为 35 kV、66 kV、150 kV。Alstom 公司制作 Powerformer 的业绩见表 1。

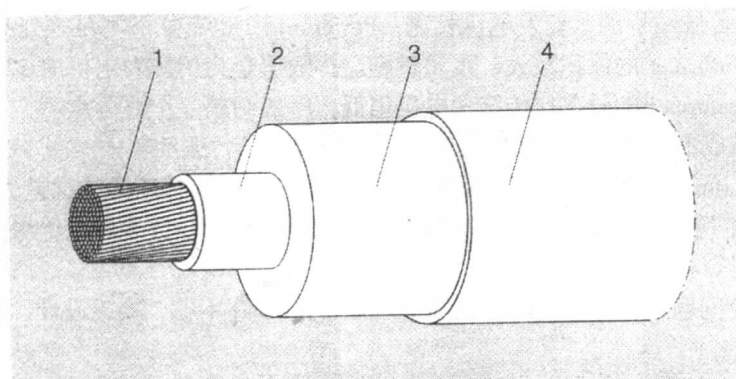
表 1

序号	电站名称	容量 (MW)	电压 (kV)	$\cos \phi$	转速 (r/min)	投运时间	备注
1	Porjus (瑞典)	11	45	0.93	600	1998.5.30	水电样机
2	Eskilstuna (瑞典)	42	136	0.933	3000	2000.12.13	火电
3	Porsi (瑞典)	75	155	1.0	125	2001.5.5	水电
4	Höljebro (瑞典)	25	78	1.0	115.4	2001.6	水电
5	Miller Creek (加拿大)	29.3				2002	水电

Höljebro 水电站 Powerformer 的定子见图 2。从图可以清楚的看到 XLPE 电缆绕制的定子绕组端部。用于 Powerformer 定子绕组的高压电缆见图 3。这种电缆与通常输配电用电缆的区别是没有金属屏蔽和外皮，即为传统电缆的电缆芯。



图 2 Höljebro 水电站的 Powerformer 的定子



1. 电缆股线 2. 内层半导体层 3. 固体绝缘 (XLPE) 4. 外层半导体层

图3 Powerformer 用的绕组电缆

和传统水轮发电机相比，Powerformer 的优点是：

(1) 输出电压很高，可以与电网直接相连，电站可省去传统发电机系统所必须的封闭母线、出口开关和升压变压器，从而可以节省电站的占地面积，降低发电站的总投资费用（约 10%），提高发电站的总效率（约 2%）。

(2) Powerformer 的定子绕组采用交联聚乙烯（XLPE）电缆连续绕成，为线电缆集中绕组，绕组周围的电场分布比较均匀。

(3) 在同等功率下，Powerformer 的输出电压很高，额定电流和突然短路电流很小，因此容易解决传统发电机中由于电流大而带来的振动、焊接等诸多问题。

(4) 在 Powerformer 中，由于电缆中的电流磁密度较低，故定子铜耗较低，而铁心由于磁密较高而铁损增加。图 4 为 Porsi 水电站中传统发电机和 Powerformer 的定子损耗分解对比（该电站既装有传统发电机，也装有同样功率的 Powerformer）。从图 4 可以看出，Powerformer 的铁耗远大于铜耗。这一点有利于简化冷却系统，因为铁心接地，电势为零。铁心可以通过插入水管通水冷却。

损耗的分布

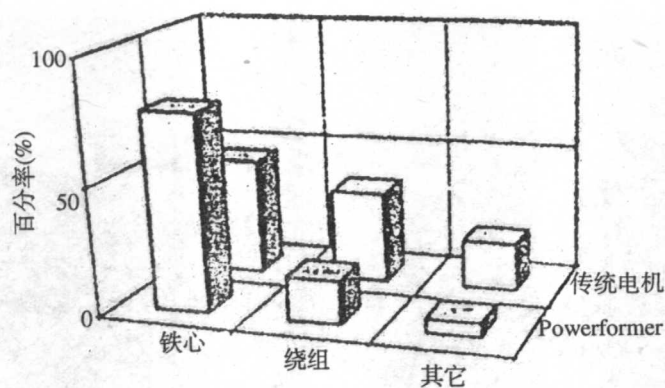


图4 Porsi 电站传统电机与 Powerformer 的定子损耗对比

但是, 和传统结构的水轮发电机相比, Powerformer 也有如下不足之处:

(1) Powerformer 的体积较大, 重量较重。一般重量为传统发电机的 120%~140%。

(2) Powerformer 的效率比传统发电机稍低, 一般约差一个百分点。

(3) 电缆成形、槽内固定比较困难, 定子齿部较长, 振动较大。

(4) Powerformer 中的铁耗大, 因此铁心温升高、铁心与机座间的温差大 ($15^{\circ}\text{C}\sim 24^{\circ}\text{C}$)。如果设计不当 (如机座刚度很高), 则容易引起铁心变形, 导致导体电绝缘的损伤、振动加剧、冲片断裂等。

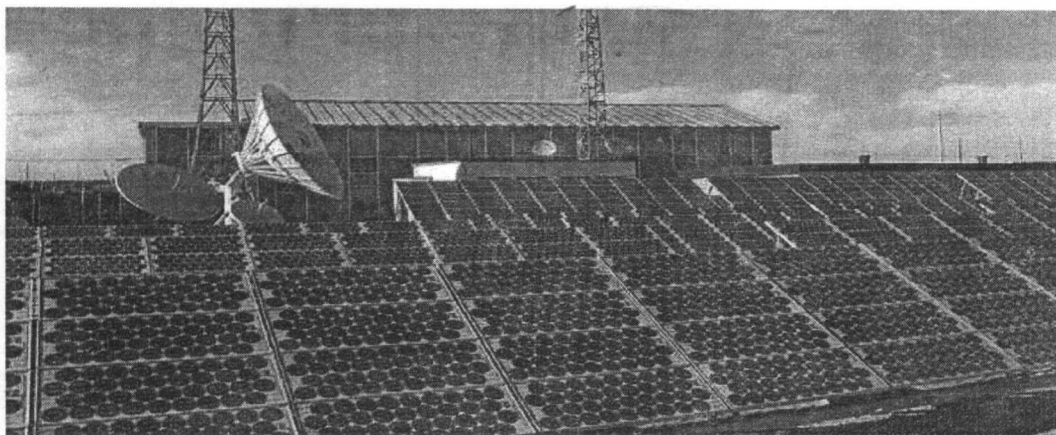
(5) 主要问题是, 目前我们对 Powerformer 的认识还不够, 缺乏设计、制造、运行等方面的经验。

目前, 输电用交联聚乙烯电缆的耐压水平已超过 500 kV。据此, Alstom 公司认为, 目前可以制造 245 kV 的 Powerformer。并提出水电站用 Powerformer 的应用范围为 20MW~800MW; 电压 25 kV~245 kV。也就是说, Powerformer 可用于所有大中型水电机组。同时, 根据 Alstom 公司的长期开发计划, Powerformer 的额定电压将达到 420 kV。

总之, Powerformer 的问世是电机结构、绝缘系统和冷却方式的一场革命, 其发展前景和发展势头令国内外专家十分欣喜。虽然 Powerformer 本身还有许多问题尚待解决, 发展道路上还存在一些不确定因素, 但其发展前景十分广阔。对于 Powerformer 我们应有所认识, 采取适当应对措施, 选择合适工程项目, 跟踪和开发, 特别是用在火电站用的 Powerformer 以及风电场用的 Windformer 和动力工业用的 Motorformer。

编者注: 本文摘选自戴庆忠先生撰写的“当代世界水电设备技术进展述评”一文, 原文刊在《东方电机》2002 年第 2 期, 个别文字略有更改。

我国西藏地区安装了 1500 多套太阳能发电系统



关于超高压发电机-Powerformer

沈梁伟

(哈尔滨大电机研究所)

Powerformer 的原理及优点

ABB 公司利用集成概念对系统进行了优化, 历经 8 年的时间, 开发出一种新型的超高压发电机, 用于水力发电机械和火力发电机械, 商品名被称之为: Powerformer。它用在风力发电上, 就称为: Windformer; 用在电动机上, 就称为 Motorformer。

这种新型超高压发电机的定子绕组与常规电机不同, 采用电缆绕制的集中绕组。是利用交联聚乙烯 (XLPE) 电缆制成的定子高压绕组, 它可避免定子电流过大而引起的一系列的麻烦, 如冷却问题、绕组振动和焊接困难等问题。每根电缆长约 100 m, 用标准的电缆接头连接。电缆的电场分布均匀, 这更符合麦克斯威定律, 图 1 为矩形定子线棒和圆形电缆电场分布的比较。

超高压发电机的转子结构不论是水轮发电机还是透平发电机都与常规电机一样, 超高压发电机用空气冷却, 定子铁心用不锈钢管通水冷却。

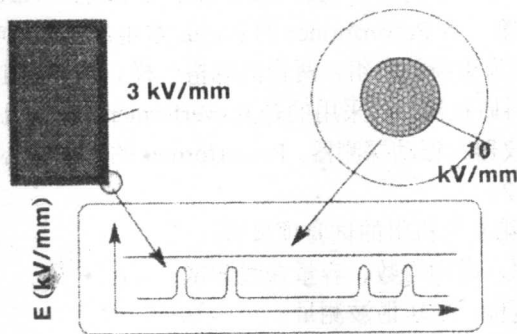


图 1 矩形定子线棒与电缆式绕组电场的分布比较

Powerformer 简化了系统, 取消了发电机出口开关, 封闭母线, 升压变压器, 可以直接与电网连接, 维护工作量减少, 系统效率可提高 2%, 造价可节约 10%左右。通过寿命周期评估 (LCA) 表明, Powerformer 生产与普通发电机同样电能所用燃料少, 废气排放量低, 对环境影响小。又因其惯性常数 (GD^2) 通常比传统发电机的大, 有利于电力系统的安全稳定运行。但是, 就发电机来说, Powerformer 的体积比常规发电机的要大。

目前, Powerformer 已步入商品化轨道, ABB 提出的 Powerformer 应用范围见表 1。ABB

公司研制的用在水、火电上的 Powerformer 见表 2。

表 1

电站	容量	电压	频率	转速	励磁方式	标准
类别	(MW)	(kV)	(Hz)	(r/min)		
水电	20~800	25~245	50/60	60~900	无刷或静态	IEC 或 ANSI
火电	40~200	30~150	50/60	3000/3600	无刷或静态	IEC 或 ANSI

表 2

电站名称 (MVA)	容量	电压 (kV)	转速 (r/min)	投运日期	备注
水 电					
Porjus	11	45	600	1998-5 月	样机运行 全面试验
Porsj	75	155	125	2001-5 月	老机改造
Holjebro	25	78	115.4	2000-10 月	老机改造
火 电					
Eskilstuna	42	136	3000	2000-12 月	样机, 经过全面试验

Powerformer 的供货范围与传统发电机不同, 包括主机及其控制和保护设备, 如励磁、继电保护、仪表及并网设备, 将发电机连接到电网的设备包括高压电缆, 高压开关和测量变压器。

2001 年 6 月, CIGRE/SC11 的与会人员参观了位于瑞典 Västeras 的 ABB 电气研究中心, 并访问了装有世界上第一台 Powerformer 的 Porjus 水电站。该水电站建于 1910 年, 前 7 台已退役, 第 8、9 号机组为更新的机组, 两台的规格一样。8 号机组仍采用常规机组, 供教学培训之用; 9 号机组为科研机组, 即采用的是 Powerformer。对该机的试验项目制订的很全, 安装了大量的 PD 测试仪器和振动探测器。Powerformer 的定子铁心齿高约为轭的 4~5 倍, 铁心齿的振动较大, 见图 2。

对 Projus 水电站第 9 号机组的试验项目有:

- (1) 损耗、效率、时间常数、容量曲线测试。
- (2) 电缆表面电位、电压谐波测量。
- (3) 机械振动等测量。
- (4) 噪声测量。
- (5) 甩负荷试验。
- (6) 温升试验。
- (7) 空载、短路试验。
- (8) 辅助绕组(供低压厂用电)负荷及对主绕组的影响。
- (9) 单相、两相、三相突然短路试验, 绕组单相接地试验。
- (10) 雷电冲击试验。

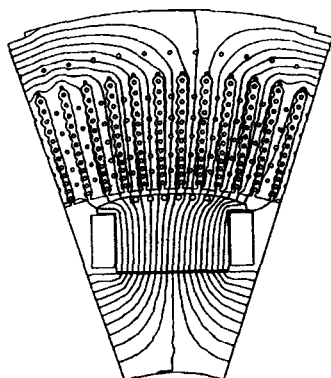


图2 Porjus水电站第9号机组 (Powerformer) 磁通计算图

表3 为传统发电机与超高压发电机 (Powerformer) 的比较

表3

传统发电机	Powerformer
电压低 (< 30 kV)	电压高 (>30kV)
电流大	电流小
温升高	温升高
齿短	长齿
重量=1	重量=1.2~4
允许 PD	无 PD
绕组	挤压成型
成型分部绕组	线电缆集中绕组

CIGRE 的专家们认为, Powerformer 很有前途, 它节约了成本, 并提高了发电系统的可靠性。专家们也针对有关事宜提出了问题。例如, 对电缆耐压的要求, 这么硬的电缆将如何成型, 电缆在槽内如何固定, 定子齿的振动幅值, 突然短路电流与常规相比的大小等。有趣的是, Powerformer 与传统电机相比, 突然短路比预计的要小很多, 见表4。

表4 传统电机与 Powerformer 内部短路时故障电流的比较

传统电机		(Eskilstuna 电站)		Powerformer	
15kV 外部网				150 kV 外部网	
短路电流				短路电流	
三相对地	53kA			三相对地	17kA
二相对地	45kA			二相对地	16kA
二相相间	45kA			二相相间	14kA
一相对地	<0.1kA			一相对地	16kA

关于 Windformer

由于环保问题已引起全世界的关注，努力开发再生能源，大力发展风力发电已形成世界潮流。仅是 2001 年全世界的风力发电装机容量就增加了 6500 MW，达到了 2.4 MW，由此可证明风电已成为受欢迎的一种能源。开发风力发电技术以成为工业发达国家的一项竞争市场。

ABB 公司正是看准了这一极有前景的市场，他们以 Powerformer 的技术为基础，颇有新意的又开发出 Windformer。它同 Powerformer 一样，与传统风力发电机相比，有着许多诱人的特点。

新开发的 Windformer 是高度集成的又一典范，图 3 为 Windformer 与常规风电场的风力发电机的主要结构的比较。该发电机采用同步电机，定子绕组由电缆绕成，额定电压为 20 kV。转子为永磁钢，取消了常规电机用的齿轮变速箱，使维护工作量减少。频率是随风速而变化的高压交流电经整流器变成直流电，由直流电缆传送减少了损耗。输送到逆变器变成所需的交流电，经系统变压器升压后并网。一个 Windformer 包括若干个风力发电机组，每台为 3 MW，每组容量为 40 MW。首批单机容量为 3 MW 的风力发电机已在瑞典的 Näsudden 电站安装。

ABB-Windformer 的主要优点是损耗小，每个 WTG（整套风力发电机）的功率减至最小，增加了可行性，电网中交流电波动减少了，可以对有功、无功分别进行控制。

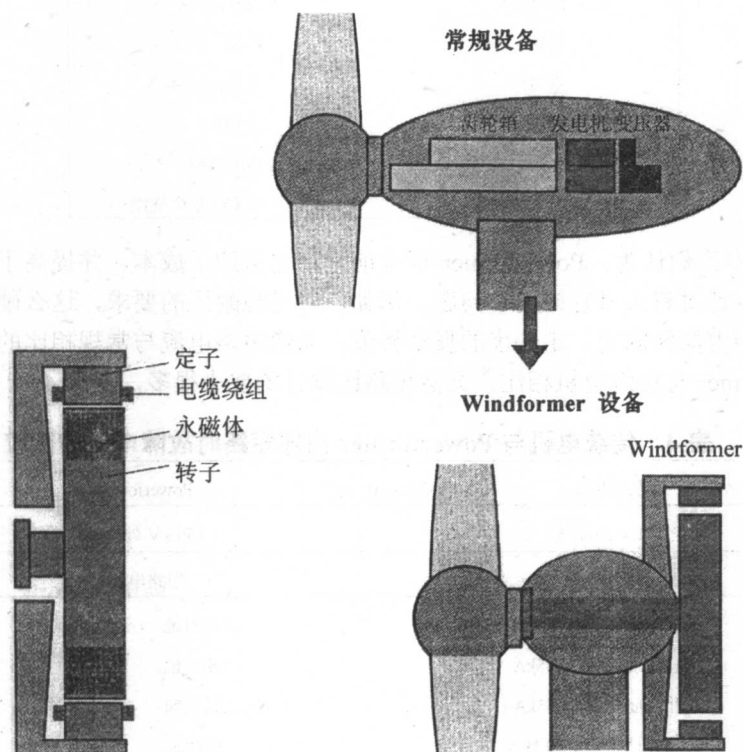


图 3 Windformer 和常规设备的比较

表 5 为 Windformer 和传统的装有异步发电机的风电站的不同之处。

表 5

Windformer	装有异步发电机的风力发电场	
透 平	透 平	
	齿轮箱	
Powerformer 发电机	异步发电机	
永磁铁转子	功率因数校准器	
二极管整流器	软起动	
	透平变压器	
直流电缆	交流电缆束	
	↓	
	< 40km	> 40km
	输电变压器	输电变压器
		HVDC 站
	输电变压器海上平台	用于 HVDC 站及输电变压器的海上平台
直流输电电缆	交流输电电缆	直流输电电缆
直流逆变器	SVC 电站	HVDC 站
系统变压	系统变压	变压系统

Motorformer

自 1998 年推出 Powerformer 以来, ABB 公司的工程师们根据同样的原理, 成功的开发出称为 Motorformer 的超高压电动机。它具有降低投资、节省场地、提高效率、减少维护等优点。以往用于驱动压缩机和泵之类的工业机械所使用的大型电动机, 其功率范围在 1000kW~5000kW 之间, 电压在 3 kV~15 kV 之间。由于输电线路的电压比上述电机的额定电压要高的多, 所以, 在电网和电动机之间必须安装一个或多个降压变压器。这些变压器不仅需要一大笔费用, 而且还存在引发火灾和漏油之类的隐患。Motorformer 不需要使用降压变压器, 可直接连到高压电网, 在 Motorformer 中, 如同 Powerformer 一样, 使用交联聚乙烯电缆, 制成定子绕组, 额定电压有 35 kV、66 kV、150 kV, 其它部件如转子和机座等均无变动。Motorformer 采用直接在线起动方法, 起动电流为 2~5 倍额定电流。在电动机不产生过热的前提下, 通过对机械转矩和电网电压降的优化, 求出电动机的合适参数。

第 1 台 Motorformer 是同步电机结构形式, 以后如市场需求量大, 将会再开发出这种结构形式的异步电机。

由于 ABB 公司掌握着全新的工艺技术, 而使海上钻井平台所用设备得到彻底简化。他们最近又向设在挪威海湾 70 公里处的 Troll 海上钻井平台提供两台 Motorformer。它用于压缩机系统的传动。Motorformer 的单台功率是 40 MW, 直接和 42 kV 的母线相连接, 电压为 70 kV。

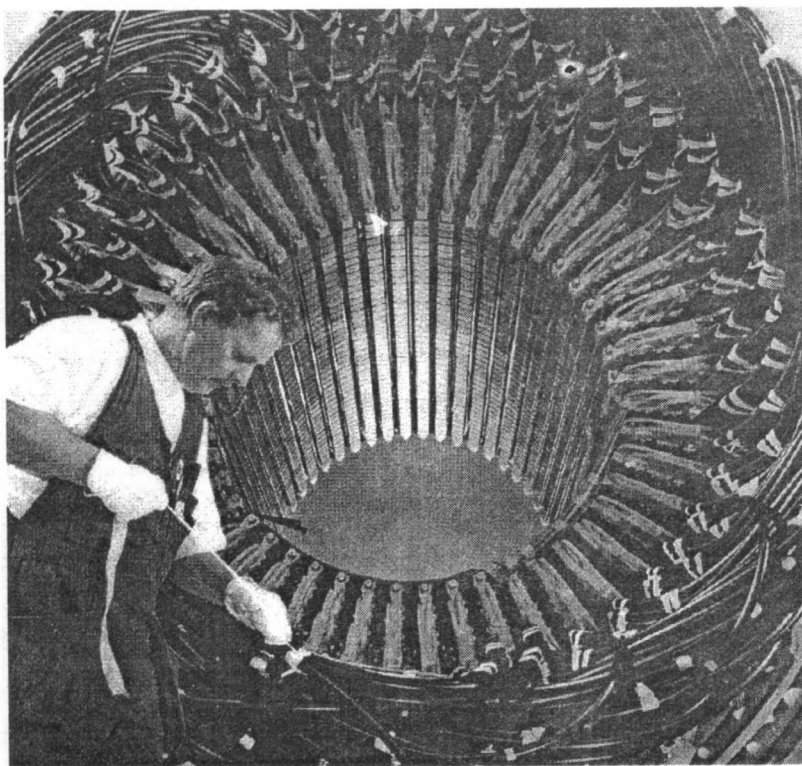


图4 Motorformer 端部绑扎

关于 Powerformer 的冷却系统

由于 Powerformer 的定子绕组电缆中的低电流，铜耗和铁耗相比，铜耗远远小于铁耗，正好和传统发电机相反。因此，冷却重点放在铁心上。在当前设计中，Powerformer 有两套主要的冷却系统，转子和绕组端部用空气冷却，而定子铁心用水冷却。冷却水管轴向插入定子铁心。冷却水管也是由交联聚乙烯材料制成，和绝缘材料本质相同，只是水管用的是更高密度的材料。塑料管的运用可以消除管子和铁心间短路的危险，也可以避免在接头和管子中产生涡流。由于铁心处于低电位，所以冷却水不必像传统的水冷却定子绕组那样，要对水进行电离。而 Powerformer 所用的冷却水可以采用普通的自来水。用水冷却的定子铁心比用空气冷却的定子铁心有如下几个方面的优点：（1）水冷却定子的空气流动低，风阻和摩擦损耗降低；（2）水冷却定子没有空气槽，使电机更为紧凑，优化了电机体积；（3）Powerformer 的定子比传统发电机的定子有更大的温度时间常数，故 Powerformer 有很好的过载能力。

编者注：本文摘选自哈尔滨大电机研究所原副总师沈梁伟写的“国外发电机的新发展及我们的差距”，该文刊登在2001年《国外大电机》第3期，经作者同意，对个别文字进行了修改与补充。

Powerformer 定子槽漏抗计算

周垂有 戈宝军 王志敏 宋福川
(哈尔滨理工大学 哈尔滨 150040)

摘要: Powerformer 是一种新型超高压发电机, 它采用圆形电缆作为定子绕组。为了提高输出电压的等级, Powerformer 绕组采用多层同心式。本文主要利用解析法和有限元法对 Powerformer 槽漏抗进行推导和计算, 并将计算结果进行比较。

关键词: Powerformer 槽漏抗 解析法 有限元

1 引言

定子槽漏抗是电机的一个重要电磁参数, 它对电机的运行性能有重要影响。长期以来, 一直沿用文献[1]的设计公式来计算电机定子绕组的槽漏抗。但 Powerformer 是一种不需借助升压变压器而直接和输电网相连接的新型超高压发电机^[2, 3], 它采用圆形截面导体取代矩形截面导体作为定子绕组。由此带来了定子结构及相应的一些参数计算公式的变化。本文利用解析法推导出 Powerformer 的槽漏抗计算公式, 并用有限元法进行验证。

2 解析法

推导时作如下假设^[4]:

(1) 假定槽内的磁导率即为空气的磁导率 μ_0 , 不考虑磁铁中的磁压降。

(2) 假定电流在导体截面内均匀分布, 不考虑电流的集肤效应, 通过的电流大小为 I 。

(3) 忽略电枢表面的曲率。

(4) 设共有 n 个圆形槽, 每个圆形槽中线圈边中串联导体数为 $\frac{N_s}{n}$, 整个槽串联导体数为 N_s 。

(5) 连接两个圆形槽的矩形槽(以下称槽的矩形部分)的尺寸相同, 宽为 b , 高为 h ; 圆形槽的尺寸全相同, 半径皆为 r 。

注意要考虑任意两个圆形槽导体之间的互感。对于同心式绕组只有整数槽的情况。

由图 1 可见, 对于圆形槽部分有:

$$\left. \begin{aligned} dx &= r \sin \alpha \cdot d\alpha \\ b_x &= 2r \sin \alpha \\ S_x &= r^2 \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \\ S &= r^2 \left(\theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) \end{aligned} \right\} x = r(1 - \cos \alpha)$$

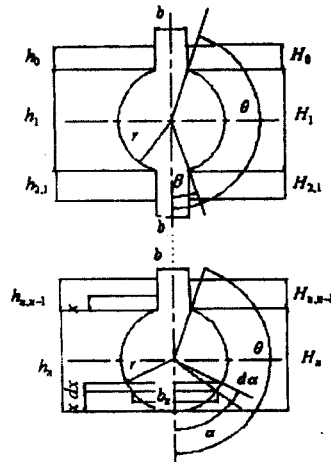


图 1 多层圆形半闭口槽图

对于槽的矩形部分: $b_x = b$

在这里把整个槽形分成多段, 各段的高度分别为: $h_n, h_{n,n-1}, \dots, h_{2,1}, h_1, h_0$; 每段的磁场强度分别为:

$$H_n = \left(\frac{N_s}{n} I \frac{S_{xn}}{S_n} \right) \frac{1}{b_x}$$

$$H_{n(n-1)} = \left(\frac{N_s}{n} I \right) \frac{1}{b_x}$$

$$H_{(n-1)} = \left(\frac{N_s}{n} I + \frac{N_s}{n} I \frac{S_{x(n-1)}}{S_{(n-1)}} \right) \frac{1}{b_x}$$

.....

$$H_{12} = \left(\sum_{j=12}^n I \frac{N_s}{n} \right) \frac{1}{b_x}$$

$$H_1 = \left[\sum_{j=12}^n I \frac{N_s}{n} + \frac{S_{x1}}{S_1} I \frac{N_s}{n} \right] \frac{1}{b_x}$$

$$H_0 = \left(\frac{N_s}{n} \sum_{j=2}^n I \right) \frac{1}{b_x}$$

已知槽内磁场能量为各段槽高范围内磁场能量之和, 即:

$$W_m = W_{mn} + W_{m(n-1)n} + \cdots + W_{m12} + W_{m1} + W_{m0}$$

上式中:

$$W_{mn} = \int_0^{h_n} \left(\frac{1}{2} \mu_0 H_n^2 \right) (b_x l_{ef}) \cdot dx$$

$$W_{m(n-1)n} = \int_0^{h_{n-1}} \left(\frac{1}{2} \mu_0 H_{n(n-1)}^2 \right) (b_x l_{ef}) \cdot dx$$

.....

$$W_{m1} = \int_0^{h_1} \left(\frac{1}{2} \mu_0 H_1^2 \right) (b_x l_{ef}) \cdot dx$$

$$W_{m0} = \int_0^{h_0} \left(\frac{1}{2} \mu_0 H_0^2 \right) (b_x l_{ef}) \cdot dx$$

结合假设,把上述公式进行迭代,可得:

第 k 个圆形槽的自感漏磁导为:

$$\lambda_k = \frac{r^4}{2S^2} \left(\frac{1}{3} \theta^3 - \frac{1}{4} \sin 2\theta + \frac{1}{2} \theta \cos 2\theta + \frac{1}{8} \theta - \frac{1}{32} \sin 4\theta - \frac{1}{3} \beta^3 + \frac{1}{4} \sin 2\beta - \frac{1}{3} \beta \cos 2\beta - \frac{1}{8} \beta + \frac{1}{32} \sin 4\beta \right) + (k-1) \frac{h}{b} + \frac{h_0}{b} + \frac{(k-1)}{2} (\theta - \beta)$$

第 k_1 个圆形槽和 k_2 个圆形槽之间的互感漏磁导 (设 k_1 大于 k_2):

$$\lambda_{k_1, k_2} = \frac{r^2}{2S} \left(\theta^2 + \frac{1}{2} \cos 2\theta - \beta^2 - \frac{1}{2} \cos 2\beta \right) + 2(k_2 - 1) \frac{h}{b} + 2 \frac{h_0}{b} + (k_2 - 1) (\theta - \beta)$$

当槽口甚窄时, $S \approx \pi r^2$, $\theta \approx \pi$, $\beta \approx 0$, 则得:

$$\lambda_k = 0.623 + (k-1) \frac{h}{b} + \frac{h_0}{b} + 1.57(k-1)$$

$$\lambda_{k_1, k_2} = 2(k_2 - 1) \frac{h}{b} + \frac{h_0}{b} + 3.14k_2 - 1.57$$

第 k 个圆形槽中线圈边的自感为 L_K , k_1 和 k_2 个圆形槽线圈边的互感为 M_{k_1, k_2} 。

其中:

$$L_K = \left(\frac{N_s}{n} \right)^2 \mu_0 l_{ef} \lambda_k$$

$$M_{k_1, k_2} = M_{k_2, k_1} = \left(\frac{N_s}{n} \right)^2 \mu_0 l_{ef} \lambda_{k_1, k_2}$$