

# UPFC 水冷却系统结构分析

徐阳, 谢天喜, 贾勇勇, 陶风波, 周志成  
(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

**摘要:**换流阀是统一潮流控制器(UPFC)的核心,而水冷却系统则对保证换流阀的安全可靠运行具有十分重要的作用。以换流阀水冷却系统为研究对象,从内冷却系统和外冷却系统两方面对其结构进行了详细分析,采用类比法搭建了UPFC水冷却系统结构的电路结构,明确了系统中各个模块的结构和组成,最后对串联水路和并联水路进行了比较,讨论了并联水道流量分布不均匀的问题。

**关键词:**统一潮流控制器; 水冷系统; 串联水路; 并联水路

**中图分类号:** TM571.6

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2016)01-0049-04

统一潮流控制器(UPFC)自上世纪80年代提出以来受到科学界和工程界的广泛关注,被认为是柔性交流输电的未来<sup>[1-3]</sup>。UPFC的主要工作原理是通过电力电子设备(换流阀)及控制系统来改变串联变压器的输出电压相角及幅值,从而达到优化控制线路潮流及系统电压的目的<sup>[4-6]</sup>。

换流阀是UPFC最关键的部件之一<sup>[7]</sup>,换流阀中的核心部件是电力电子器件,电力电子器件是温度敏感器件,温度对其影响十分巨大,主要表现在以下两方面:首先,每个电力电子器件都有工作温度的限制,例如硅(Si)芯片的安全工作温度一般为 $-40\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,当器件结温处于安全工作温度范围内时,超过芯片最高允许结温时(Si芯片的最高允许结温一般为 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),芯片将会失效,所以高温对于器件的危害是致命的。其次,电力电子器件本身对温度变化非常敏感,例如绝缘栅双极型晶体管(IGBT),有实验表明,当器件结温为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其关断时间约为 $25\text{ }\mu\text{s}$ ,而当结温为室温时,其关断时间仅为 $18\text{ }\mu\text{s}$ ,所以器件的关断时间随着结温的升高而延长,造成关断损耗的增大。温度的变化影响器件的稳态特性和开关特性,会使功率变换器的运行指标偏离设计目标,一旦器件发生不可恢复性失效,将直接导致系统的故障,造成巨大的生命危险和经济损失。因此,散热系统对UPFC中换流阀设备的安全健康运行至关重要。文中建立了UPFC水冷却系统结构的电路结构,对串联水路和并联水路进行了对比分析。

## 1 水冷却系统基本结构

### 1.1 总体结构

目前常用的散热方式有自然空冷散热、强迫风冷散热、液冷散热和热管散热等,图1给出了不同散热方式下表面热流密度与器件温升的关系,为电力电子

设备冷却方式的选择提供了依据。对于大功率换流阀而言,由于其器件的热流密度很大,需要采用高性能的散热方式。强迫水冷却是一种换热能力强、换热效率高的散热方式,在汽车工业中被广泛应用,但在换流阀设备中的应用才刚刚起步。

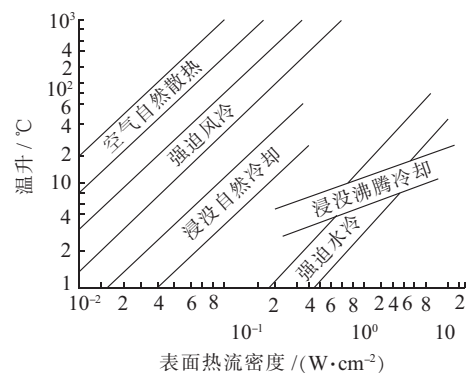


图1 不同散热方式所允许的器件热流密度范围

换流阀水冷却系统一般分为内冷却系统和外冷却系统,内冷却系统是对换流阀本体进行换热,外冷却系统是对内冷却水进行换热,总体结构如图2所示。

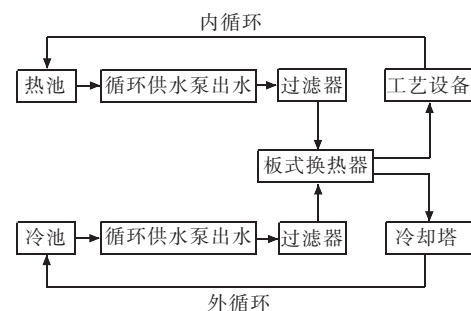


图2 水冷却系统结构

换流阀水冷却系统其工作原理为:恒定压力和流量的冷却介质通过内冷却系统源源不断流进大功率电力电子装置被冷却器件,温度上升并将被冷却器件产生的热量带出,经过主循环泵后与室外外冷却系统进行热交换,使冷却介质温度降低至合理范围后再次流入被冷却器件,形成冷却介质的闭式循环。

## 1.2 内冷却系统

内冷却系统主要由主循环冷却回路、水处理回路、氮气稳压回路、补水回路等构成。

### 1.2.1 主循环冷却回路

主循环冷却回路是内冷却系统的核心,它主要由主循环水泵、管道回路、储气罐等构成。通过主循环水泵将冷却水输送到换流阀中,通过内冷却管道回路中的逆止阀、截止阀、三通阀、电动蝶阀、排气阀和排水阀等来控制冷却水的流向和流量,这样冷却水便在主泵和换流阀之间构成了一个封闭的回路,保证换流阀持续散热要求。储气罐作用是自动排除系统的残留气体。

### 1.2.2 水处理回路

水处理回路一般由离子交换器和精密过滤器构成,通过对冷却水中离子的不断脱除,达到长期维持冷却水极低电导率的目的。

### 1.2.3 氮气稳压回路

氮气稳压回路一般由氮气瓶、脱气罐、缓冲罐等构成。其工作原理为:当冷却水因少量外渗、电解而损失时,稳压系统会将冷却水压入循环管路系统以保持管路的压力稳定和冷却水的充满;当冷却水因温度变化而产生体积变化时,稳压系统会缓冲其对循环管路系统的影响,保证系统的正常运行。

### 1.2.4 补水回路

补水回路主要由补水罐和补水泵组成。其工作原理为:当水箱液位降低至补水液位时,系统启动补水泵自动补水;当补水罐液位降低至低值时,发出报警信号,提示操作人员向补水罐加水,以保持其液位正常。

## 1.3 外冷却系统

外冷却系统主要用来冷却主循环冷却水,使其下降到规定温度重新进入内冷却系统。外冷却系统是一个开放式的水循环系统,使用经过软化处理的水通过冷却塔持续对内冷却系统管道进行冷却,降低内水冷却温度。外冷水系统一般包括冷却塔、喷淋泵、水处理单元、平衡水池等。外冷却系统通常有风冷结构和喷淋冷却结构 2 种。

### 1.3.1 冷却塔

冷却塔的作用是通过喷淋水和风扇对阀内水冷散热管进行冷却。多数直流输电工程每极配有 3 台蒸发式密闭循环型冷却塔,2 台冷却塔就能满足直流系统额定负荷时的冷却需求。在正常情况下,系统运行时 3 台冷却塔均可投入运行。

### 1.3.2 喷淋泵

喷淋泵为外冷水提供循环动力,一般每极配置 4 台喷淋泵,用于分别向 3 台冷却塔提供喷淋水,1 台作为备用,当其中任意 1 台喷淋泵故障时会通过旁通阀将故障隔离,并将备用喷淋泵接入该台冷却塔。

### 1.3.3 水处理单元

外冷水使用的水对水质的要求不如内冷水高,但在实际运行中还是需要进行相应的水质处理。因为自来水中的铁、镁等离子会逐渐沉淀散热片表面,日积月累会导致散热效果下降;自来水中的微生物也会腐蚀外冷水管道,在使用前必须对其进行过滤。因此在工程中外冷水处理单位基本分为软化和灭菌两大功能。

### 1.3.4 平衡水池

平衡水池的水由主、备 2 台工业泵进行补给,由喷淋泵将平衡水池内的水抽到冷却塔对内水冷却管道中的散热管进行喷淋冷却,然后回流到平衡水池中。平衡水池一部分的水经过水处理单元进行软化和灭菌后流入平衡水池中。

## 2 南京 UPFC 中的水冷却系统结构

### 2.1 整体结构

#### 2.1.1 主要技术参数

南京 UPFC 工程采用 3 组容量为 60 MV·A 的换流阀,其单组换流阀的损耗功率不超过 600 kW。针对 3 组换流阀采用了常州博瑞制造的 3 套结构相同的水冷却系统,每套水冷却系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 产品主要技术参数

项目	数值
冷却容量/kW	660
额定流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	83
额定电压/V	6-AC 380 4-DC 110
设计进阀压力/MPa	0.35~0.6
整机功率/kW	130
产品重量/t	2.5

从表 1 中知,单台水冷却系统的额定冷却容量为 660 kW,是单组换流阀损耗功率的 1.1 倍,具有一定的裕度。

#### 2.1.2 基本构成

UPFC 水冷却系统结构如图 3 所示,主要由主循环冷却回路、去离子水处理回路、稳压系统(氮气稳压系统或高位水箱稳压系统)、补水装置、外循环冷却系统(水风换热器形式)、冷却介质及管路、电气控制系统等组成。

与常规水冷却系统采用冷却塔的形式不同,UPFC 外冷却系统直接采用干式空气冷却方式,该方式配置  $N+1$  台直联风机,冷却容量设置留有一定的余量,具有如下优点:(1)适用于较低环境温度或缺水地区,节能节水;(2)采用不锈钢轧铝翅片作为散热主体,高效洁净;(3)风机系统成本低,可靠性高。

UPFC 水冷却屏柜系统主要用来对水冷却系统进行监视、控制和保护,包括主水泵控制、补水泵控制、风

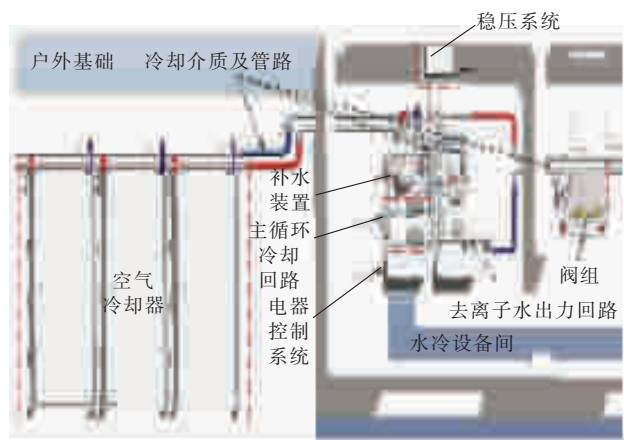


图 3 水冷却系统结构

机控制、电动三通阀控制、缓冲罐气压控制、过电流保护、过电压保护、欠电压保护、相不平衡保护、相序保护、缺相保护和时间管理等。

### 2.1.3 工作原理

UPFC 水冷却系统主要工作原理如下:主循环冷却水在主循环泵动力作用下,通过外冷却系统进行散热后,流经大功率电力电子装置被冷却器件,带走被冷却器件的热量后流回主循环泵入口。

通过在主循环冷却回路上设置的供水温度变送器反馈的信号,控制装置电动三通阀调节进入外冷却系统的冷却水流量及外冷却系统投入冷却的数量,达到精确控制冷却系统冷却水温度的目的。被冷却器件通过内冷却系统带走热量,并在外冷却系统散出热量,实现连续冷却的功能。

由于主循环冷却水先流经外循环冷却系统,再进入大功率电力电子装置被冷却器件进行冷却,它具有 2 个明显的优点:一是减小冷却水经主循环泵加压后对大功率电力电子装置的冲击作用;二是保证整个系统运行时,大功率电力电子装置进口处的水温最低,冷却效果较好。

### 2.1.4 冷却介质

由于被冷却器件在高电压条件下工作<sup>[8,9]</sup>,为避免冷却介质中存在杂质离子,导致各元件之间形成漏电流,UPFC 水冷却系统中采用高纯水,循环管路均采用 304 不锈钢管,接触部分金属材质均为 304 不锈钢及以上,非金属材质为聚四氟乙烯、硅橡胶等性能稳定的材料。

## 2.2 水路结构

如果将水泵类比为电源,将水流类比为电流,将每种设备的存在阻力可以类比为电阻,则水冷却系统的水路可以表示为电路的形式。

图 4 以电路结构形式建立了 UPFC 中水冷却系统的水路结构。与普通电路不同的是,该电路结构具有明确的方向性,如图中箭头方向所示。从图 4 中可以清晰

地看出,UPFC 工程中的主循环冷却回路从主水泵出发经过外冷却风冷机组、主过滤器到达换流阀单元,之后经由脱气罐和加热器构成的脱气加热系统回到主水泵。主循环回路采用了 2 台主水泵的冗余设计,1 台运行,另 1 台作为备用,提高了系统的可靠性。

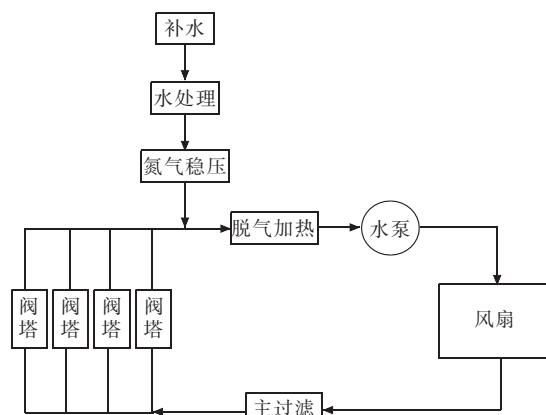


图 4 水冷却系统电路结构

由氮气瓶和缓冲罐构成的氮气稳压回路并联于主循环冷却回路中。而以离子交换器和精密过滤器构成的水处理回路,和由储水罐和补水泵构成的补水回路则串联于氮气稳压回路中。

UPFC 工程中的每套外冷却系统配置 6 台风机组,采用并联连接方式。该水冷却系统用来冷却 UPFC 工程中的 1 个阀厅单元,每个阀厅由 4 组阀塔构成,4 组阀塔之间采用并联水路连接。每组阀塔内部由 84 个换流阀子模块构成,各个子模块之间也采用并联水路连接。

从上面的分析可知,无论是外冷风机还是换流阀模块,UPFC 水冷却系统的水路全都采用了并联水道方式连接。

## 3 串联和并联水道

根据水力学知识可知:

$$Q = uA \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

式中: $Q$  为流量; $u$  为流量系数; $A$  为面积; $\Delta P$  为压力差; $\rho$  为流体密度。因此,流体流动的动力为管路两端的压差,压差越大,流速越高,即流量越大。

然而管道中的流速是有一定限制的,因为管道内部粗糙,而所有的流体都有一定的黏度,所以流体在管道中流动有一定的阻力,流速越快,阻力越大。

根据 Darcy 公式,沿程水头损失为:

$$h_f = \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

式中: $h_f$  为沿程水头损失; $\lambda$  为水头损失系数; $l$  为管道长度; $D$  为管道内径; $v$  为管道流速; $g$  为重力加速度。

### 3.1 串联水道特点

当水道串联时,由流体力学理论可知,管道的阻力损失与流量成平方关系。由于采用串联管道,势必会增加管路的长度,造成管道阻力的增大,因此串联系统中的水泵压力需要增大。

串联水道的优点是管路相对简单,管道内流量不变,不存在分配问题,最主要的缺点是串联水道的可靠性低,前端水道的损坏会导致其全部后端水道失去功能,其次由于串联水道流过各个换流阀存在先后顺序,会造成其温度分布不均匀,末端的散热效果会变得极差。因此,串联水道已经很少单独应用于换流阀系统中。

### 3.2 并联水道特点

水道采用并联连接时,并联水道中的水流量增加,而水道两端的压差不变。

采用并联水道能保证每个水冷元件都得到冷却,具有管路布置相对简单,冷却效果也较好,可靠性高的优点。但是存在并联管路中流量分布不均匀的缺点,而且系统规模越大其流量分布就越不均匀,其次是接口多而杂且管道成本高于串联。

并联水道的结构通常有以下 2 种布置方式,如图 5 所示。

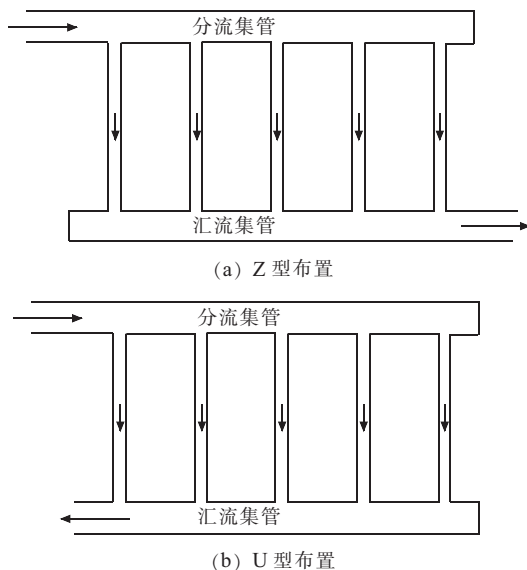


图 5 并联水道布置方式

无论哪种布置方式都存在水道内每个并联支路流量分布不均匀的问题。图 6 给出了一种典型的 Z 型水道压力分布,从图中可以看出,其压差分布呈现进口和出口压力大、中间压力小的分布趋势。这将造成水流量主要从靠近进口和出口的并联支路中流过,从而影响中间换流阀的散热效果。

为解决并联水道中水流量分布不均匀的问题,图 7 给出了理想情况下水道压力分布,如果设计阶段能根据该压力分布设计水道,则可以减小分布不均匀的问题。

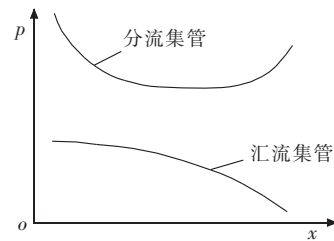


图 6 并联水道不均匀分布压力

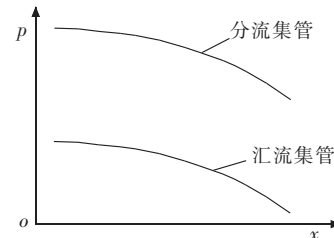


图 7 并联水道均匀分布压力

## 4 结束语

分析了换流阀水冷却系统组成、结构和功能,建立了 UPFC 水冷却系统结构的电路形式结构,该结构极大方便了电气工程师对于水冷却系统结构的理解,指出了并联水道存在流量分布不均匀的优化问题,并给出了优化思路,对水冷却系统的结构优化具有一定的意义,为提高 UPFC 中换流阀的可靠性提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 刘黎明,康勇,陈坚,等. 统一潮流控制器控制策略的研究与实现[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):114-119.
- [2] 刘永江. UPFC 控制策略研究及对电力系统的影响[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [3] 黄方能,黄成军,陈陈,等. UPFC 稳定控制器的研究及应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):101-105.
- [4] 张振华,江道灼. 基于 MMC 拓扑的 UPFC 控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(3):73-77.
- [5] 刘黎明,康勇,陈坚,等. UPFC 的交叉耦合控制及潮流调节能力分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10):42-48.
- [6] 章勇高,康勇,刘黎明,等. 统一潮流控制器并联变换器的改进型双环控制系统[J]. 中国电机工程学报,2007,27(4):40-46.
- [7] 唐爱红,程时杰. 基于 PSCAD/EMTDC 的统一潮流控制器动态仿真模型[J]. 电网技术,2005,29(16):6-10.
- [8] 魏旭,谢天喜,陶风波,等.  $\pm 500$  kV 直流输电线路暂态故障监测装置的设计与应用[J]. 江苏电机工程,2014,33(6):23-25.
- [9] 尹元明,谢天喜,周志成. 线路安装串联电抗器后断路器 TRV 分析[J]. 江苏电机工程,2014,33(6):45-47.

### 作者简介:

徐阳(1987),男,江苏扬州人,工程师,从事高压直流输电和柔性交流输电研究工作;  
谢天喜(1983),男,湖北天门人,高级工程师,从事电力设备结构优化及电力系统过电压研究工作;

(1) UPFC 装置不会提高系统的短路电流水平,对系统短路电流有一定的降低效果;

(2) 通过计算,该工程的投运可以解决南京西环网的潮流瓶颈问题,投产年夏高峰正常方式及  $N-1$  方式下,无线路潮流越限的情况;

(3) 为满足投产年及远景年各种方式下潮流调节的需要,本期在铁北—晓庄双回线路上安装 UPFC 装置,其串联变容量按  $2 \times 60 \text{ MV} \cdot \text{A}$  是合适的,但为了更好地满足远景的适应性,可将串联变容量适当扩大。

## 6 结束语

南京市电网 2016 年左右开始出现输电瓶颈问题,大大降低了电网的整体供电能力和安全可靠水平。若采取传统措施,无法解决供电问题,适应电网发展的需求;建议加装 UPFC 装置,满足 2016 年及远景电网的发展。但由于 UPFC 为新兴设备,国内暂无运行管理经验,建议加强对 UPFC 装置的监测监管工作。

参考文献:

- [1] 陈剑平,李林川,张芳,等.基于 PASAP 的 UPFC 潮流控制建模与仿真[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(2):66-70.
- [2] 李骈文.美国 INEZ 变电站统一潮流控制器简介[J].电网技术,2002,26(8):84-87.
- [3] 宋晓燕.统一潮流控制器(UPFC)在湖南电网中的应用研究[D].北京:华北电力大学,2012.
- [4] 王海潜,祁万春.统一潮流控制器在城市电网中的应用研究[J].电子技术与软件工程,2013,17:122-123.
- [5] 王建,吴捷.统一潮流控制器的建模与控制研究综述[J].电力自动化设备,2000,20(6):41-45.

作者简介:

- 王莹(1986),女,江苏常州人,工程师,从事电力规划研究工作;  
甄宏宁(1985),男,江苏南京人,工程师,从事电力规划研究工作;  
常宝立(1981),男,河北唐山人,工程师,从事电力系统稳定分析控制研究工作;  
许文超(1979),女,江苏盐城人,高级工程师,从事电力规划研究工作;  
姜崇学(1987),男,黑龙江佳木斯人,工程师,从事直流输电保护研究工作。

## Research on the Application of UPFC in Nanjing Western Grid

WANG Ying<sup>1</sup>, ZHEN Hongning<sup>1</sup>, CHANG Baoli<sup>2</sup>, XU Wenchao<sup>1</sup>, JIANG Chongxue<sup>2</sup>

(1.China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2.Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** With the load increases, the problems, such as limited transfer capacities of power imported channels, unbalanced power flow distributions and so on, facing Nanjing Western grid increase. This paper studies these problems and analyzes countermeasures. Through the analysis it is found that it is necessary to install UPFC in Nanjing Western grid. The effect of UPFC on the power grid is investigated by calculation. Results show that UPFC can effectively solve these problems.

**Key words:** unified power flow controller (UPFC); Nanjing western grid; transfer capacity

(上接第 52 页)

贾勇勇(1986),男,江西九江人,工程师,从事开关类变电设备状态评价工作;

陶风波(1982),男,江苏常州人,高级工程师,从事电力系统过电压

及脉冲功率研究工作;

周志成(1977),男,湖南株洲人,高级工程师,从事电力系统过电压及输电线路运行维护方面研究工作。

## Structural Analysis of Water Cooling System of UPFC

XU Yang, XIE Tianxi, JIAYongyong, TAO Fengbo, ZHOU Zhicheng

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Converter valve is the core of Unified Power Flow Controller (UPFC). Water cooling system, as the "guardian" of converter valve, is very important for its safety and reliability. In this paper, the structure of water cooling system is studied. First, a detailed analysis of the structure is carried out from two aspects: the internal cooling system and the outside cooling system. Then, the circuit of UPFC water cooling system is built by analogy method, which makes the structure and each module clear. In the end, the comparison between series water load and parallel water load is presented, and the problem of uneven distribution of parallel channels is discussed.

**Key words:** UPFC; water cooling system; series water load; parallel water load

# 欢迎投稿 欢迎订阅