

柔性交流输电技术和用户电力技术的新进展

何大愚

(中国电力信息中心 100011 北京)

摘 要 根据经过长期酝酿才在 IEEE PES 1997 冬季会议上发表的 FACTS 新定义,并从主流的电力电子型和新出现的新接线方法以及新构成材料 3 个方面介绍了 7 种新型 FACTS/CusPow 控制器,即转换静止补偿器、矩阵换流器、电力质量调整器、相间功率控制器、定制型 FACTS 控制器、聚合物型故障电流限制器以及可控流体阻尼器。这些新成就代表了 FACTS/CusPow 技术的功能向广度及深度发展的现状和前景。

关键词 柔性交流输电技术 用户电力技术 控制器 电力系统控制 电工材料

分类号 TM 721 TM 761

0 引言

柔性交流输电技术(FACTS)^[1]和用户电力技术(简称为 CusPow)^[2]是快速发展的姊妹型新式电力技术。和 EMS 及 DMS 相类似,它们可柔韧控制电网的性能依靠着相同的基础技术,只是针对不同的需求分别应用于输电系统和配电系统中。

FACTS 和 CusPow 的共同基础技术是电力电子技术,各自的控制器也在结构和作用上相同,其差别仅是额定电气值不同。所以根据其发展趋势,一方面可以认为 CusPow 应包括在供电型 FACTS 控制器一类中^[3];另一方面 FACTS 可能将其直接控制功能的范围从交流输电(在此范围内可以认为 FACTS 中不包括 HVDC)扩展到交流电网(在此范围内 HVDC 就成为 FACTS 控制器家族中功能最强、规模最大的控制器)。换言之,可以认为:CusPow 技术就是配电系统中的 FACTS 技术。

所谓“柔性控制”主要是区别和相对于原来交流电网中的常规“刚性控制”而言。这不仅由于前者主要依靠电子型技术,后者常是机械型或机电型技术;而且更重要的差别在于其控制作用的快速性、精确性、连续性、鲁棒性(柔韧性^[4])、有效性等性能中。

每种新技术都具有自己规范性的含义或定义,以概括说明其技术内涵和发展的本质特征、功能作用以及与其相近技术的差别界限等。FACTS 和 CusPow 的含义和界面一直众说纷纭,创建人自己的说法也一变再变^[1,4]。IEEE PES 的 FACTS 术语和定义专题组经过 3 年中 4 次专题组会议讨论,而且经过专题组全体成员与 CIGRE 的 FACTS 工作

组联席会议的共同讨论后,才提出了一个有权威性的 FACTS 定义^[4]。这个定义比较“宽松”,甚至有些含糊,但却为 FACTS 和 CusPow 的新发展保留了充分的余地。本文的主要目的即结合新的具体发展趋势,试图解释此新定义,并展示其广阔的技术发展和应用前景。

1 IEEE PES 的 FACTS 新定义及其含义

1997 年 IEEE PES 冬季会议上发表了 FACTS 工作组中“术语和定义专题组”的文章^[4],其中对 FACTS 的定义如下:

所谓柔性交流输电(FACTS),即是装有电力电子型或其他静止型控制器以加强可控性和增大电力传输能力的交流输电系统。FACTS 控制器是可提供一个或多个控制交流输电系统参数的电力电子系统和其他静止型设备。

笔者认为,从上述新定义中可得出:

a. 只要将上述定义中的控制功能改为“加强供电可靠性和提高电能质量”,再将“交流输电系统”的应用对象改为“配电系统”,上述定义就变成了 CusPow 的定义。

b. FACTS 和 CusPow 的控制功能主要仍将依靠飞速发展(新的元器件不断出现,性能和功能不断改进提高)的电力电子技术。

c. “其他静止型控制器或设备”指的是什么?虽然不少外国学者早已将 PSS 列入 FACTS 控制器家族,但显然还不止于此。根据这两年的新发展,“其他”含义中还将包括利用接线或构成的新方法和新材料形成的控制器。

d. 关于 FACTS 和 HVDC 的关系,此定义未涉及。

2 电力电子型控制器的新发展

2.1 转换静止补偿器(CSC)

由纽约电力局(NYPA)和 EPRI 的专家共同建议,并联合西屋公司和 PTI 合作研究的强功能新型控制器——转换静止补偿器(convertible static compensator,缩写为 CSC)^[5]标志着 FACTS 的直接控制对象从交流输电线扩展到交流电网。

CSC 和 STATCOM,UPFC,SSSC^[3]一样是基于 GTO 电压源换流器的控制器(见图 1),但它除满足各种系统控制要求和对接线或运行变化具有适应能力外,还具有除分别提供上述 3 种 FACTS 控制器的功能之外的 2 种新型控制器的功能,即“线间潮流控制器(缩写为 IPFC)”和“多线(multi-line)或广义(generalized)UPFC”的功能。

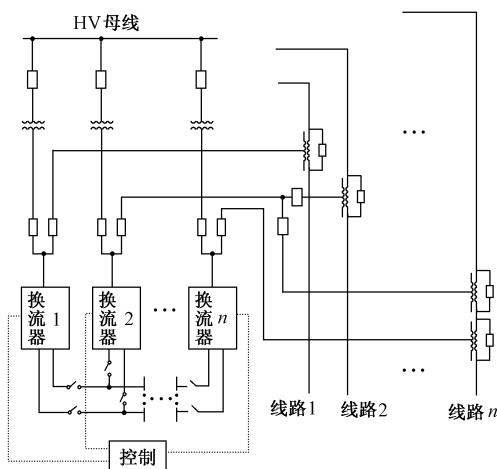


图 1 多换流器 CSC 的接线示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of a multi-inverter CSC

图 2 中示出基于 CSC 原理的双回线 IPFC。它利用每条线上的 SSSC 串补,在独立控制无功的同时,可实现在补偿线路之间传输有功功率,以达到柔性控制电网潮流的目的。其运行功能是:均衡两线上的有功,从过载线上向欠载线上“转换”有功,补偿线路的电阻性压降及相应的无功功率,增强系统抗动态干扰(暂态稳定和振荡阻尼)的能力。即为有多回输电线的变电站或电网提供高效控制装置。

将每一换流器逆变侧的耦合变压器串入不同线路中,即成为该线的 SSSC 输出;将其 DC 端联接在一起,即成为有功功率交换的通道。这样从一线路上抽取的有功必须和注入另一线的相等。如果是多线 IPFC,则可用在一些线路上进行二维补偿,而在其他线路上只进行 SSSC 补偿,以保证有功平衡。如欲补偿有功的不平衡或增大动态电压支持的能力,用图 3 中所示的“广义 UPFC”即可达到此目的。技术

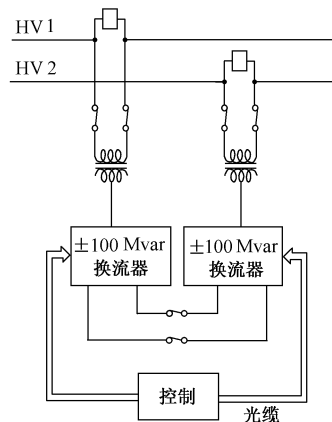


图 2 两回线路的 IPFC 接线图

Fig. 2 Block diagram of a two-line IPFC

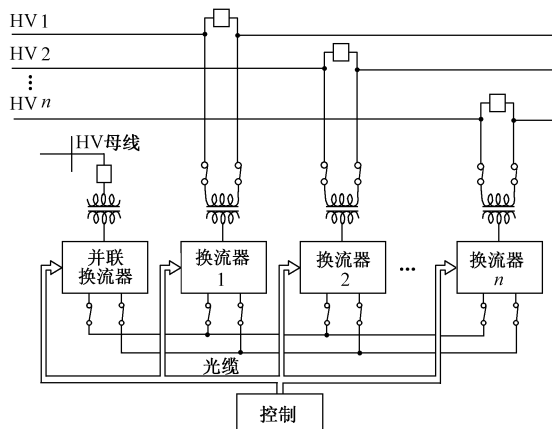


图 3 广义 UPFC 的接线图

Fig. 3 Block diagram of the generalized UPFC

详情及其将在纽约系统中的应用均见文献[5]。

2.2 电压源矩阵换流器

国内外都有人设想过以 FACTS 技术研制出可代替背靠背直流输电的异步联网装置。现在几经改进完善、又经模型验证的成果^[6]已问世。这种称为电压源矩阵换流器(voltage source matrix converter)的装置,其额定总容量和一套背靠背 GTO 型直流输电装置相当,但却具有更多的功能。即除了具有改变两端频率、移相范围 360° 和双向传输有功功率的能力外,还有 100% 的阻抗补偿能力和在线路两端独立控制有功和无功的能力。其中共轭补偿阻抗的能力可显著提高同步功率,改进暂态稳定性能。

它由三相电压源 GTO 换流器及两端耦合变压器组成(见图 4),整流侧变由 9 个单相变压器组成。所有性能皆在矩阵换流器中实现。

2.3 电力质量调整器(或调制器),即 PQC(或 PQM)

精密加工工厂或质量标准高的高新技术产品的

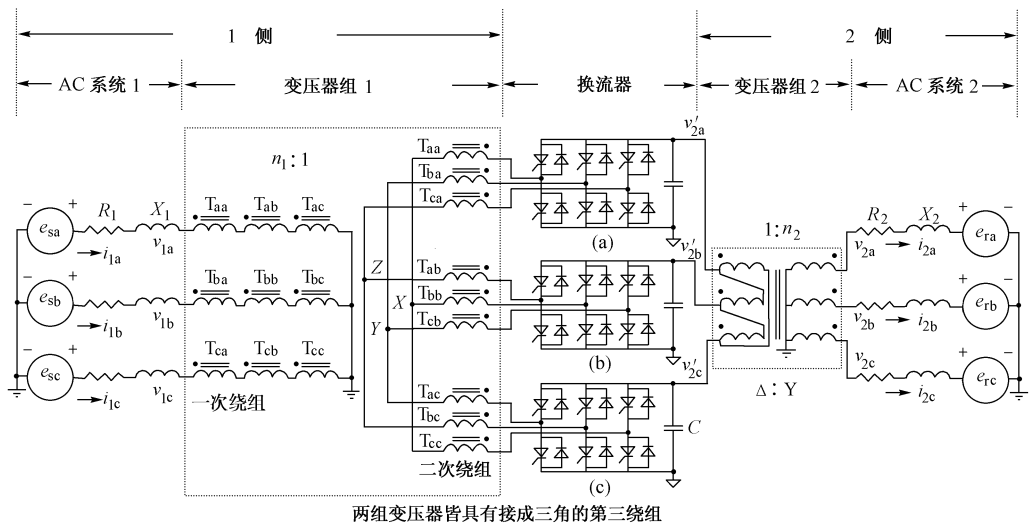


图 4 输电线路中接入矩阵换流器的异步联网装置
Fig. 4 Schematic diagram of matrix converter asynchronous link in transmission line

生产过程都对电能质量和供电可靠性提出了更高的要求,电力质量调整(制)器(power quality conditioner(or modulator),缩写为PQC或PQM)便应运而生。它们可快速补偿供电电压中的突降或突升,波动和闪变,谐波电流和电压,各相电压的不平衡以及故障时的短期电压中断。所以是一项具有综合功能的FACTS/CusPow控制器。图5为西门子公司已系列生产出的PQC装置(SIPCON)。它是基于IGBT的PWM换流器,为众多此类研制品中较有代表性的产品^[7]。

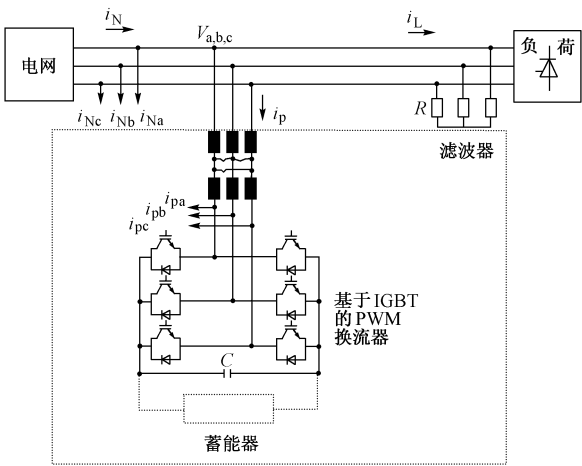


图 5 西门子生产的 PQC (SIPCON)
Fig. 5 PQC (SIPCON) manufactured by SIEMENS

图 6 示出其与系统联接的 3 种方式,并联时,主要防止非正常负荷对系统的影响(谐波、无功补偿、负荷平衡和闪变);串联时,则用于防止系统对负荷的影响(电压突升或突降,电压变形或不平衡);而当串并联接入时,则将具有双向补偿的功能。

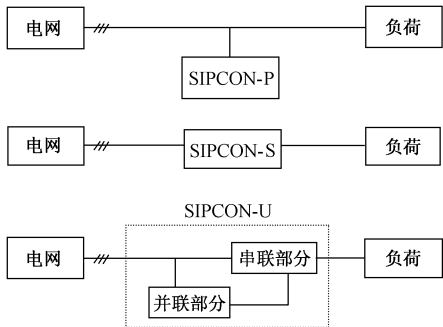


图 6 SIPCON 与系统之间的联接
Fig. 6 Scheme of SIPCON linking up with power system

图 5 中的虚线示出直流侧具有蓄能器的方案。此时,PQC 将具有补偿故障时供电电压下降的功能(见图 7)。

3 用其他新方法形成或改进的控制器

3.1 可不用电量电子技术的 IPC^[3]

在 PES 给予 IPC(interphase power controller 的缩写)的定义^[4]中就规定了它既可用电子开关,也可用机械开关控制。IPC 结构简单,可解耦电压,独立调节线路有功和无功功率,可提高输送能力并限制短路电流。它的改进型结构更简单,将一常规移相变压器并联一电容器即可构成一台 IPC,同样可提高稳态输送能力。国外已有多系统拟采用此装置^[3],我国国家电力公司也拟设项研究。

3.2 改变接线方法的“定制型 FACTS 装置”

现有的 FACTS 装置大多是并联或串联接入一次系统中,其额定功率受系统被控参量的要求,常常

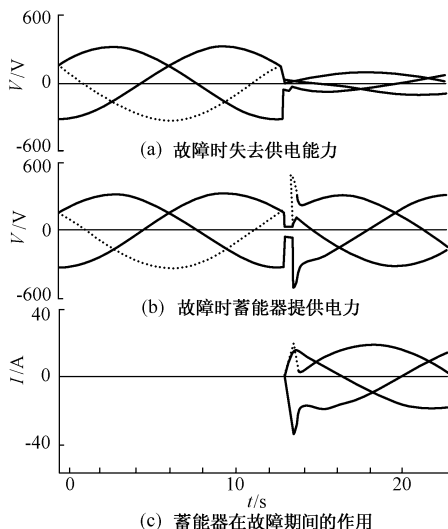


图7 应用PQC的蓄能器保证故障时供电
Fig. 7 Undisturbed supply provided by storage with PQC

容量过大;另一方面,FACTS控制器用以代替原有“刚性”机械型的控制器(例如变压器分接头或常规串联电容补偿等),而不是与其协调组合共同发挥作用,这样就会降低其性能价格比以及整体效能。为了进一步改进FACTS技术,一种量体裁衣式的定制型FACTS装置已经问世。其实质是将以IGCT(切换电流达4 kA~5 kA)构成的电压源换流器(VSC)以最优方式与常规控制装置相结合。可利用电网中原有变压器将VSC接入系统,从而节省当前FACTS装置常用的大功率耦合变压器。图8和图9中分别示出其接入电力变压器的接线方式和其控制潮流的向量图。

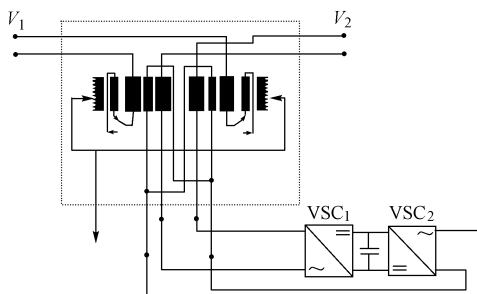


图8 VSC接入单相电力变压器的二次绕组和第三绕组的中性点
Fig. 8 VSC injection into the neutral point of the secondary and tertiary windings of a single phase transformer

这种新式的定制型FACTS装置的优点可以概述如下:

a. 由于带负荷调节变压器分接头(采用机械型或真空开关型的切换开关)已广泛应用于电源端和

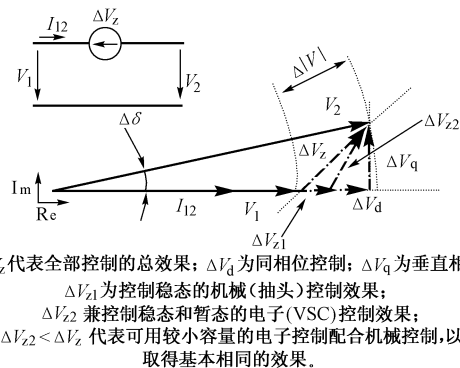


图9 VSC和分接头调节共同控制潮流的向量图
Fig. 9 Vector diagram related to combined power flow control by VSC and tap changer

变端的主变上,利用其中性点接入VSC,以控制电网潮流(控制电压和角度),将为稳态和暂态控制提供更廉价而有效的技术手段,应用前景广阔。

b. 充分利用原有电力设备中已有的常规控制措施的控制能力(不是废除或代替,而是补充或改进)。只应用3个分接头切换,即可将具有平滑控制能力的快速控制区扩大一倍。

c. 按电网控制需求“量体裁衣”,可以避免目前FACTS装置常有的“规模过大”的缺点。

d. 对于串联型(可解耦分别控制有功和无功)的FACTS装置,定制型也只需要一台自耦变压器,以代替原来并联和升压用的耦合变压器。

e. 由于无需耦合变压器,接入低压端降低了绝缘水平,无需大型滤波器以及辅助配合发挥作用等原因,设备造价将大为降低,占地面积也将减少。

已在开发研究和模型试验过程中的两种定制型FACTS控制器(复合潮流控制器和综合潮流控制器)^[8]已取得良好结果,只需在协调常规与柔性控制环节的综合控制系统上再作一些改进完善,即可使此技术问世。

4 由各种新型材料制成的控制器

电力系统中已应用多种新材料的电器,如合成材料制成的绝缘子、穿墙套管、避雷器等部件。最近又将高分子聚合物或复合材料研制成一些性能优良的新型控制器,并在实用中显示出良好的应用前景。

4.1 聚合物型故障电流限制器(PCL)^[9]

由STC聚合物构成的聚合物型故障电流限制器(polymer-based fault current limiter,缩写为PCL)是研究高分子聚合物的化学专家和电力工程师合作研制出的一种突破性设备,可显著改进电网和供电系统的控制能力。同时也可作为新型熔断器使用,而且比常规熔断器的性能更好,这是因为

PCL 可重新接入,反复使用。

其原理是将常规已用于绝缘材料的聚合物用导电微粒子加以适当处理,使其具有高导电性(即具有它所代替的熔断器一样的导电性能)。如果有控制地将导电粒子添加入各种聚合物,即形成 PCL。它将以“热胀冷缩”的原理起作用,即当它承受过负荷或故障电流时,PCL 将受热膨胀,其导电粒子快速分裂开,此时其电阻将突然增大 100 多万倍,从而立即使电路断开,以消除过负荷或故障条件。当故障清除后,PCL 因冷却又会恢复到原导体状态。过程的作用参数将以材料的不同予以调节,并形成系列产品。所以 PCL 以其结构简单和功能良好可构成具有复合功能的低廉切换装置。

美国海军将以 PCL 改进其新型战舰上电路系统中回路开关的相互配合,并用 PCL 保护其新采用的固态开关。西屋公司也将以此补充改进其新一代的 FACTS/CusPow 技术,如用于各种电动机控制回路的保护、各种电器的保护等^[9]。初步应用研究显示:PCL 同样可有效地应用于各种交流或直流网路中,尤其对克服直流电路控制的困难更具吸引力。

4.2 可控流体阻尼器(CFD)^[10]

图 10 中示出用复合材料制成的可控流体阻尼器(controllable fluid damper,缩写为 CFD)装置的结构原理和工作性能。

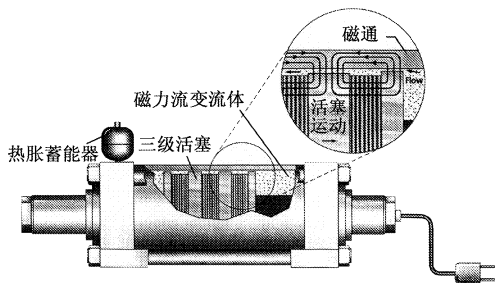


图 10 可控流体阻尼器的结构

Fig. 10 Structure of CFD

可控流体阻尼器的外壳是一液压缸,内部有一个三段活塞。缸容积的 40% 充以类似矿物油的高粘性物质(专利),此粘流质中悬浮着微小而光滑的球形铁粒子,其直径只有约 $1\ \mu\text{m}$ 。此悬浮质流体一遇到外加电磁场后,立即在几个毫秒内凝固,而且其凝固的程度与外加磁场的强弱相关。此情况下,阻尼器立即产生一个相当大的应力,起到阻尼作用。例如 CFD 的试验样机 MRD-9000(见图 10)的质量为 250 kg,可产生的阻尼力为 200 kN。与具有更多动态部件的常规阻尼制动系统相比,CFD 的运行更可靠,且具有更大的能量效益,正常运行时的磁场只需 50 W 的电力。

由于阻尼力的方向和大小皆可由电磁场予以控制,即可与控制计算机相联接,由计算机监控系统监测控制对象,并调节阻尼力,以满足控制的需要。

目前正在研究将此类装置用于建筑物、桥梁等结构的防震、防风等,其更小型装置已可用于大型卡车或货车,并用于训练用的自行车赛车^[10]。但同样可以设想能将其用于大型发电机的机械阻尼,即将统一控制的多台 CFD 对称地安装于发电机转子的相应构架,以控制和阻尼发电机的振荡行为。其客观效果将和可控电气制动(TCBB)相类似,并具有更良好的性能和效益,因为 CFD 可双方向起作用,并由计算机控制进行精确制动。

5 结语

a. FACTS 技术和 CusPow 技术完全可以用 FACTS 技术统一包涵。但考虑到国际上已有的规范和已存在的大量不同理解,也可以用 FACTS/CusPow 的形式予以表述,还可兼顾特定情况下 CusPow 术语单独应用的可能。

b. FACTS/CusPow 技术正在快速地向广深方向发展,性能更优良的新型控制装置也不断出现。其发展的主流仍主要依靠高新技术的电力电子器件及其技术的发展。但也应充分注意利用新接线方法和具有复合功能新型材料构成新控制装置的动向,以便能把所有非电力电子技术的一切“其他静止型控制器”都考虑在研究或应用选择的范围之内。

c. FACTS/CusPow 技术的新发展更进一步证明了这项控制电网和输电的新技术对于我国近期将兴建的大量输电和联网工程以及全国联网工程,要改造的大量城市和农村供配电电网工程的应用前景和支撑作用。

参考文献

- 何大愚. 柔性交流输电技术的定义、机遇及局限性. 电网技术, 1996, 20(6)
- Hingorani N G. 用户电力技术(Custom Power)介绍. 见: 河南省电力局柔性交流输电技术专辑. 1997
- 何大愚. 柔性交流输电技术及其控制器研制的新发展——TCPST, IPC(TCIPC)和 SSSC. 电力系统自动化, 1997, 21(6)
- 何大愚. 柔性交流输电系统概念研究的新进展. 电网技术, 1997, 21(2)
- Fardanesh B, Gyugyi L, Lam B, et al. Convertible Static Compensator Application to the New York Transmission System. In: CIGRE 1998, 14-103. 1998
- Ooi B T, Kazerani M. Voltage-Source Matrix Converter as a Controller in FACTS. IEEE Trans on Power

- Delivery, 1998, 13(1):247~253
- 7 Povh D. Power Quality Improvement of Power Systems. In: The 2nd International Conference on Control and Simulation of the Power System. Beijing: 1998
- 8 Westermann D. Rahmani M, Stemmler H, et al. Customized FACTS Devices for Cost Effective System Solutions. In: POWERCON'98 Proceedings. Beijing: 1998. 313
- 9 Ciesar J. Current Limiting Device. IEEE PES Review, 1997, 17(11):49
- 10 Kaplan G. Industrial Electronics. IEEE Spectrum, 1998, 35(1):73
-
- 何大愚,男,1931年生,教授级高级工程师,咨询。

NEW DEVELOPMENTS OF FACTS AND CUSTOM POWER TECHNOLOGY MANIFESTED BY IEEE PES DEFINITION

He Dayu (Chinese Electric Power Information Center, 100011, Beijing, China)

Abstract According to the new definition proposed at IEEE PES WM 1997, seven new FACTS and Custom Power (CusPow) controllers respectively belonging to three categories of power electronic based, new scheme based and new material based, are introduced. Those are convertible static compensator (CSC), matrix converter, power quality conditioner (PQC), interphase power controller (IPC), customized FACTS, polymer-based fault current limiter (PCL) and controllable fluid damper (CFD). These new achievements represent the new status and prospects of FACTS and CusPow technologies and predict that their functions and capabilities are developing to the further width and depth.

Keywords FACTS custom power (CusPow) controller power system control electrotechnic material