

十九 电网智能化—关于提高电能质量

1 调研背景概述

1.1 专题研究内容概述

随着全球资源环境压力的不断增大，能源需求不断增加，用户对电能可靠性和质量的要求也在不断提升。电力行业面临前所未有的挑战和机遇，建设更加安全、可靠、环保、经济的电力系统已经成为全球电力行业的共同目标。智能电网就是在这样的背景下，为实现大电网安全稳定运行，电力的高可靠性以及电力设备和资产高效利用，并且使用户能积极参与而提出的电力系统网络，它将能源资源开发、发电、输电、配电、售电、服务，以及蓄能与能源终端用户的各种电气设备和其它用能设施，通过数字化网络连接在一起，并通过智能化控制使整个系统得以优化。

智能电网的特征主要有：安全性，更好地识别和应对人为的和自然的侵害；自愈性，对电网故障的预控与自动恢复；经济性，支持全社会用电成本的优化；优质性，与未来时代相适应的服务水平和质量；互动性，与客户的智能互动，实现能量流、信息流、资金流的双向流动；清洁性，服务于低碳经济的要求。

本次调研的主要关注点是智能电网中有关提高电网输送能力，确保电力的安全可靠供应，提高能源资源的利用效率，提高电网运行和输送效率，打造坚强经济高效电网的电气设备等方面。

1.2 调研材料的主要来源

Engineers Australia

IEEE Transactions on Power Delivery

Metering International

Power

PowerGrid International

<http://www.sgcc.com.cn/>

<http://www.csg.cn/>

<http://www.abb.com.cn/>

<http://www.siemens.com/>

2 选择本专题进行调研的原因、必要性及意义

2.1 坚强智能电网在我国未来电力系统网络中的重要性

当前，在应对国际金融危机的过程中，为抢占未来经济、科技发展制高点，发达国家普遍加快了新能源、新材料、信息技术、节能环保等高新技术产业和新兴产业的发展。从能源供应的重要环节—电网的发展来看，是大力推进智能电网建设，智能化成为世界电网发展的新趋势。面对新形势新挑战，国家电网公司提出加快建设以特高压电网为骨干网架，各级电网协调发展，以信息化、自动化、互动化为特征的坚强智能电网，努力实现我国电网从传统电网向高效、经济、清洁、互动的现代电网的升级和跨越。

坚强智能电网是安全可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的电网，对全面提高电网的资源优化配置能力和电力系统的运行效率，保障安全、优质、可靠的电力供应具有重大意义。坚强智能电网是包括发电、输电、变电、配电、用电、调度等各个环节和各电压等级的有机整体，是一个完整的智能电力系统。“坚强”是基础，“智能”是关键。坚强网架与智能化的高度融合，是我国电网发展的方向。

在智能电网安全方面，随着大量非线性负荷的投入，无功功率增加，谐波含量增大，严重威胁到了电网的运行安全性。无功功率的增加会导致电流增大和视在功率增加，使发电机、变压器及其他电气设备容量和导线容量增加，同时电力用户的起动及控制设备、测量仪表的尺寸和规格也要加大；无功功率的增加，使总电流增大，从而使设备及线路的损耗增加；无功功率的增加，使线路及变压器的电压降增大，如果是冲击性无功功率负载，还会使电压产生剧烈波动，使供电质量严重降低。谐波的危害主要表现为谐波使公用电网中的元件产生附加的谐波损耗，降低发电、输电及用电设备的效率，大量3次谐波流过中线时会使线路过热甚至发生火灾；谐波对电机的影响除引起附加损耗外，还会产生机械振动、噪声和过电压，使变压器局部严重过热；谐波会使电容器、电缆等设备过热、绝缘老化、寿命缩短，以致损坏；谐波会引起公用电网中局部的并联谐振和串联谐振，从而使谐波放大，甚至引起严重事故；谐波会导致继电保护和自动装置的误动作，并会使电气测量仪表计量不准确；谐波会对邻近的通信系统产生干扰，轻者产生噪声，降低通信质量，重者导致信息丢失，使通信系统无法正常工作等。基于此，提高电能质量，保证智能电网安全势在必行。

2.2 我国提高智能电网电能质量的发展状况

我国自1990年以来已相继颁布了6项电能质量的国家标准，提高电能质量和加强电能质量的治理已成为全社会普遍关注的热点，也已取得了一定的成效。例如，某高速线材厂投运后，通过对低压采取TSF（晶闸管投切滤波器）进行无功补偿和滤波，使功率因数由0.75提升到0.95，各次谐波干扰抑制在国标限值内，有功功率由15804kW降到13644kW，吨钢耗由167kWh降到145kWh，年节电5800万kWh，年节电费314万元，1年即可收回投资。又如有关方面通过对广东省内已投入运行3年来的几十套无源滤波兼无功补偿装置的实测数据进行了统计分析，取得的

技术经济效益主要体现在：使谐波电流严重超标（2~5 倍）的用户治理合格，供电质量得到明显改善；提高了电气设备的利用率，增容 14%~41%；提高了用户的功率因数，从 0.6 左右上升到 0.9 以上，避免了功率因数罚款；减少电网及变压器有功和无功功率损耗 1/3~2/3，使用户本身有功损耗量减少 4% 左右；用户总用电电流减小 20.0%~42.7%，少受电网无功功率 25.0%~92.5%；使用户产品合格率提高 0.5~1.0%；杜绝因谐波放大使电容器损坏的事故等。

据有关统计和分析，用户一般可以在 2~8 个月内收回装置的投资。但目前围绕电能质量控制和治理方面的研究和应用，大多还局限于对电网谐波干扰影响的监测和治理，也有的提出和研究开发了一些改善和提高电能质量的补偿装置，如各种有源滤波器（APF）、动态无功补偿装置（SVC）、电能质量调节器（UPQC）、动态电压恢复器（DVR）等，技术上的先进性与国外发达国家相比尚存在一定的差距。在有源电力滤波器的研究和开发方面还处于起步阶段，主要以并联型、混合型为主，也有研究串联型的滤波设备的。清华大学研制的我国第一台高压、大容量电能质量控制器（ASCG）已经正式投入运行，并取得了一定的成效。西安交通大学已研制成功 120kVA 并联型有源滤波器试验样机。华北电力学院曾研制出强迫换相的晶闸管元件无功发生器实验设备。东北电力学院研制了 GTO 器件的静止同步补偿器（STATCOM）实验装置。河南省电力局和清华大学共同研制的 ±20MVA 的 STATCOM 在河南洛阳的朝阳变电站并网成功，这是国内首台投入应用的大容量柔性交流输电设备。虽然在理论上和实验室内均取得很大的进展，但在现场实验应用和可靠的运行上尚需进一步努力。

3 近年该专题发展新动向和值得关注点

3.1 智能电网功能构成概况

（1）高级计量体系（AMI）

高级计量体系（AMI）是智能电网的基础，它依靠双向通讯技术，使电力系统与终端电力用户之间建立起双向的通讯联系，使电力终端用户具备选择电力供应、参与电网运行优化、提供电力服务、支持电网安全运行的能力。它并非一个独立的技术实现过程，而是一个全面可配置的基础设施，并且必须集成于现在和未来的电力网络和运行过程之中。

该体系包括了分时电价（送到用户）、用户户内网（HAN）、计量数据管理系统（HDMS）、自动读表 AMR（按小时读表、远方编程、电能计量、电能质量监视、负荷调查、停运检出等）、需求响应、负荷控制、远程开合等。见图 1。

用户户内网（HAN）配合用户门户网站、连接和协调智能电表，对用户可控设备进行优化控制。其包含的设备有室内显示器、可编程通讯温控器、混合动力电动汽车、电动汽车、DG 接入、储电装置监控、其它智能电器等。

计量数据管理系统（HDMS）可以实现 AMI 系统表计管理（增加、修改、删除），AMI 系统

表计的控制（连通、断开、整定、日常管理），为电力系统的运行优化提供数据支持（负荷预测、负荷建模、系统规划、系统优化运行），为用户提供更为优良的服务。

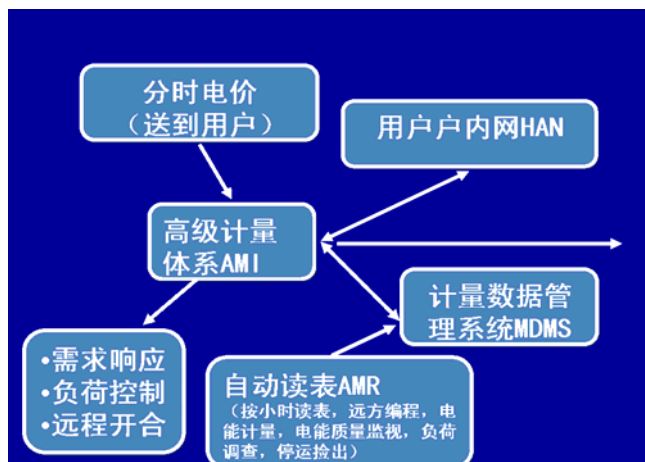


图 1 高级计量体系 AMI

电力公司利用 AMI 的历史数据和实时数据来帮助优化电网运行，降低成本及提升用户服务。例如，通过 AMI 提供的实时用户停电信息和电能值信息，电力公司能快速分析电网的不足。AMI 的双向通信能力支撑电网在变电站级和电路级的自动化。通过 AMI 获得大量数据有利于企业资产的改进或者更好地进行资产维护、增加或者替换，使电网更加高效和稳定。

在世界范围内，PG&E 耗资 17 亿美元，为 1000 万户安装电表和气表，BC Hydro 耗资 5 亿美元，为 170 万用户以及变压器和馈线上安装电表，瑞典、芬兰、英国都在计划当中，世界上至少有 150 个地区（其中 110 个在北美）打算或正在实行智能量测。

（2）高级配电运行（ADO）

高级配电运行（ADO）使配电系统的“自愈”成为可能，可极大地提高配电系统的运行可靠性和整个电网抗御干扰的能力，此外，ADO 与 AMI（高级计量体系）、ATO（高级输电运行）、AAM（高级资产管理）密切配合，从而实现配电系统（运行和资产管理）优化。

ADO 相比传统的配网运行，其优点是提高可靠性；提高配电系统效率、电能质量和能源管理水平；提高资产管理水平和设备诊断能力；通过 DER（分布式电源）和需求响应实现更好地使用发电和配电资产。

ADO 包括配电 SCADA、配电 GIS、新型电力电子装置、配电快速仿真与模拟 DFSM、DER（分布式电源）运行、AC/DC 微网运行，及高级配电自动化 ADA 高级保护与控制。见图 2。

ADO 将 DER 组成微网运行，微网可将输入输出功率的特殊电源分布于配电系统，微网间将会相互影响，进而影响电网的运行可靠性；输电系统的稳定性问题将在配电系统中存在，配电结构和微网特性的特殊性，决定了需要探讨新的稳定性理论和方法。

微网的保护与控制必需保证各状态间的平滑过渡，必须保证微网并网与独立运行状态的电能质量要求，分布式电源的多样性、电源的间歇性等增加了困难性，而多微网的协调控制和保护更

加困难。

DFSM 的基本功能包括配电（全）系统状态估计，系统性能的连续分析与优化，快速仿真（超实时），为控制争取时间，将市场、政策和风险分析聚合到系统模型之中。

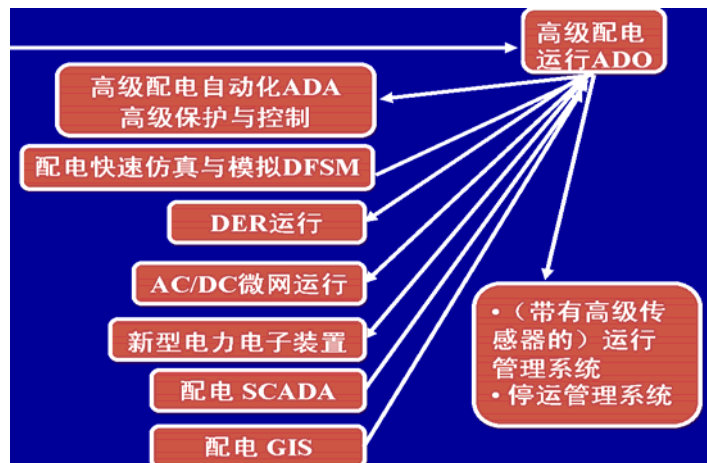


图 2 高级配电运行 ADO

（3）高级输电运行（ATO）

高级输电运行（ATO）强调阻塞管理和降低大规模停运的风险，并使大容量的间歇电源能够可靠而方便地入网运行，在我国同样关注大型可再生能源基地电力外送。此外，ATO 与 AMI（高级计量体系）、ADO（高级配电运行）、AAM（高级资产管理）密切配合，从而可实现输电系统（运行和资产管理）优化。因此，安全和可靠性是 ATO 的最大关注点。见图 3。

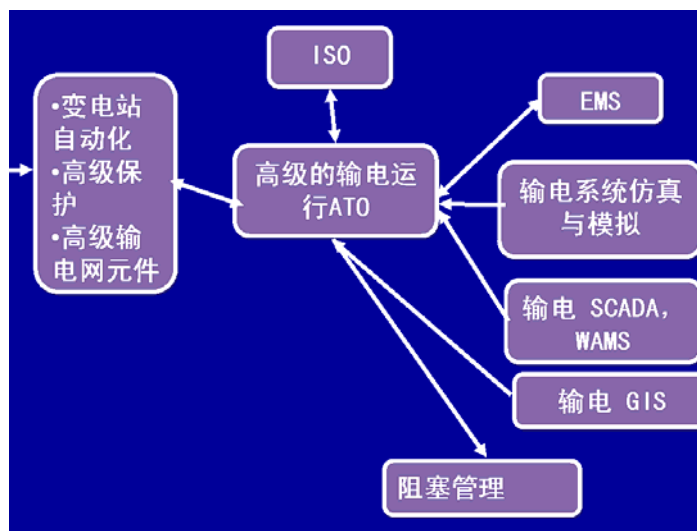


图 3 高级输电运行 ATO

相量测量单元（PMU）和广域测量系统（WAMS）为 ATO 实现提供技术支持。

PMU 可以在时间-空间-幅值三维坐标下同时观察系统全局的机电动态全貌。WAMS 具有异地高精度同步相量测量、高速通信和快速反应等技术特点，非常适合用于大跨度电网，尤其是我国互联电网的动态过程实时监控。

(4) 高级资产管理 (AAM)

AAM 与 AMI、ADO、ATO 相配合, 从电力系统的规划、建设、运行、检修维护等各个方面入手, 实现电气设备的利用率、能源综合利用效能的最大化。见图 4。

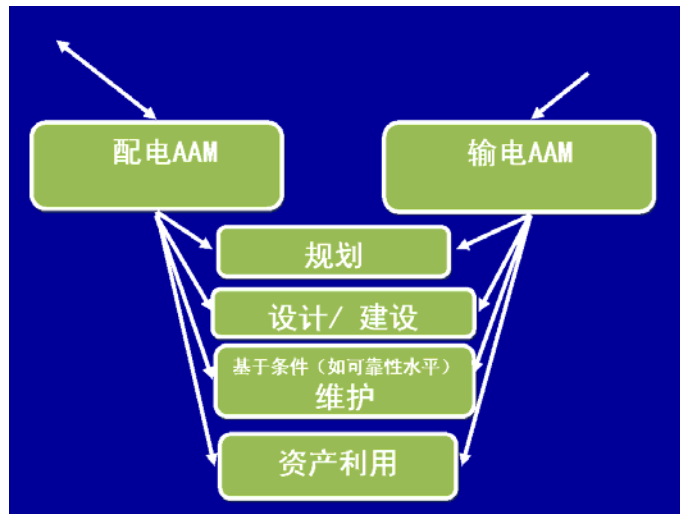


图 4 高级资产管理 AAM

3.2 提高智能电网电能质量的装置

(1) 早期提高电能质量的装置

早期的提高电能质量的装置是同步调相机和固定补偿电容器。

同步调相机是空载运行的同步电动机, 它的转子也和同步电动机一样, 都是做成凸极式的。同步调相机的转速不高, 一般为 750~1000r/min。由于同步调相机不拖动任何机械负载, 专用于补偿系统无功功率, 所以转子轴比同容量的同步电动机细小, 其空气间隙也比同步电动机小。

同步调相机也是通过改变励磁电流的大小, 实现从电网中吸收无功功率或者是输出无功功率。同步调相机载过励磁运行时, 向系统供给感性无功功率, 起无功电源的作用; 在欠励磁运行时, 从系统吸取感性无功功率, 起无功负荷的作用, 这种运行方式也称为“进相运行”。装有自动励磁装置的同步调相机能根据电压平滑地调节输入和输出的无功功率。

虽然同步调相机可以在欠励磁状态下运行, 吸收电网的无功功率, 但同步调相机进相运行时, 欠励磁情况不能太严重。如果励磁电流过小, 引起调相机的端部漏磁增大, 会造成定子铁芯端部过热。励磁电流如果太小, 还会影响电网的静态稳定。根据实际运行经验, 调相机运行的最大出力为其额定出力的 50%~65%。

同步调相机的主要优点是可以连续调节无功功率的数值, 但由于它是一种旋转机械, 有功功率损耗较大, 运行维护复杂, 响应速度慢, 且投资费用大, 近些年来已逐渐退出电网运行, 通常只在需要大容量的无功功率补偿设备时才装设同步调相机。

固定补偿电容器是提供无功功率和电压支持的最廉价方法。固定电容器的无功输出与施加到电容器两端的端电压平方和频率成正比。若电网电压高于电容器的额定电压, 电容器将会过负荷

运行，同时输出的无功功率增大；当电网电压低于额定电压时，电容器的无功输出会降低。因此当系统发生故障时，若希望电容器的无功输出维持电压水平，电容器的输出无功将减少，不利于系统无功功率的调节，故其调节性能比较差。

电容器组的接线方式通常可以分为三角形和星形接线两种。星形接线又分为中性点接地和中性点不接地两种。我国电容器组接线方式大多数采用三角形接法。当电容器的额定电压等于电网的线间电压时，在配电系统可以直接采用三角形使用。

三角形接线的电容器，直接承受线间电压，但任何一台电容器因故障被击穿时，将造成另外两相短路，故障电流很大，如果不能迅速切除故障，故障电流和电弧将使绝缘介质产生气体，会引起电容器油箱爆炸。所以，三角形接法通常用于短路容量较小的厂矿。

(2) 静止无功功率补偿器 (SVC)

静止无功功率补偿器 (SVC) 是指其输出随电力系统特定的控制参数而变化的并联连接的静止无功功率发生装置或无功功率吸收装置。“静止”是专指 SVC 没有运动或旋转部件。与同步调相机相比，SVC 是完全静止的设备。但它的补偿过程是动态的，即可根据系统无功功率的需求或电压的变化自动跟踪补偿。SVC 的一个重要特征是主要依靠晶闸管等电力电子器件完成调节或投切功能，它可以频繁地调节和投切，其动作速度是毫秒级的，远比机械设备的动作速度要快。

SVC 的称号也有一个统一的过程。在静止无功功率补偿应用的初期，它还没有明确的定义，因而称呼也很多。在国外，出了称之为 SVC 外，还被称为静止电压并联稳定装置 (SVS)、静止并联稳定装置 (SSS)。国内在上世纪 70 年代末开始引入无功功率补偿时称之为动态无功功率补偿装置，后来又称其为静止无功功率系统和 SVC。在 1986 年由国际大电网会议组织 (CIGRE) 第 38 专业委员会 (电力系统分析和技术) 统一规定为 SVC 后，才在国内外统一称之为 SVC。

SVC 的基本作用是连续而迅速地控制无功功率，并通过发出或吸收无功功率来控制它所连接的输电系统的节点电压。因此 SVC 的显著特点是能快速、平滑调节容性或感性无功功率，实现动态补偿。静止无功功率补偿系统中的各种无功功率补偿器都是用无功功率器件 (电容器和电抗器) 产生无功功率，并且根据需要调节容性或感性电流，这种调节可以采用连续调节或投切的方法进行。目前，由于它的两大特点：一是静止型，其主要部件是无转动部分；二是动态补偿，其反应速度很快，能及时跟踪无功功率快速变化做出变化，达到所设计的各种控制目标。SVC 和传统的电容器及同步调相机相比，它具有响应速度快、调节性能好、运行损耗和维护费用低，并且可作为多方面应用等优点。所以，SVC 被广泛使用，而且颇具发展潜力。与传统的电容器及同步调相机，它的唯一缺点是设计制造相对比较复杂。

目前，静止无功功率补偿器已广泛用于输电系统和工业网系统。在输电系统，控制长距离输电线路甩负荷、空载效应等引起的过电压 (动态)；改善系统的暂态稳定抑制系统的无功功率及电压振荡；维持输电线的电压，提高线路输送有功的能力，特别是由于它的快速反应，使其能对故

障引起的系统扰动提供较好的阻尼。在工业网系统中，能使电压闪变削弱到规定值范围以内；调节负荷功率因数，限制无功功率向系统倒流，减少无功功率引起的损耗，提高输电网的输送有功功率的能力，稳定和平衡系统电压；限制流向系统的谐波电流；平衡三相负荷，减少工业网对通信系统的干扰，提高用电质量。

由于静止无功功率补偿器具有优良的性能，近 10 多年来在世界范围内，其市场一直在迅速而稳定的增长，并占据了动态无功功率补偿装置的主导位置。现今的 SVC 的类型有晶闸管控制电抗器 (TCR)、晶闸管投切电容器 (TSC)、晶闸管投切电抗器 (TSR)、晶闸管控制高阻抗变压器型 (TCT) 和饱和电抗器 (SR) 等，基本类型是 TCR 和 TSC。其他补偿器是这两种的发展，例如 TCR 中的电抗器换成高阻抗变压器，则成为 TCT；将晶闸管投切电容器的电容器换成电抗器，则成为 TSR；SR 则是将普通的电抗器改换成特制的磁饱和电抗器，可以采用机械式投切，也可以采用晶闸管控制或投切。需要说明的是，晶闸管投切电抗器或电容器并不能实现真正意义上的无功功率连续动态补偿，其本质还是属于分级调节的无功功率补偿器。由此可见，SVC 需要在一定条件下才能实现无功功率的连续动态补偿，通常的方式有：TCR+TSC、TCR+FC（或 MSC）、TCR+TSC+FC（或 MSC）。

(3) 静止无功功率发生器 (SVG)

静止无功功率发生器 (SVG) 是指由自换相的电力半导体桥式交流器来进行发生和吸收无功功率动态补偿装置。SVG 由交流环节和直流环节组成，交流环节与系统相连接，SVG 是先将系统的交流电能经变流引起转换成直流并保存在直流侧的储能器内，同时直流侧电压电流经过变流器变成交流电压电流输送到系统。由于静止无功功率发生器 (SVG) 是采用自换相的变流器，它把变流器电路看成是一个产生基波和谐波电压的交流电压源，控制补偿器基波电压大小与相位，可改变基波无功电流的大小与相位。当变流器基波电压比交流电源电压高时，变压器就会产生一个超前（容性）无功电流。反之，当变流器基波电压比交流电源电压低时，则会产生一个滞后（感性）无功电流。因此它能与系统进行无功功率的交换，同时又是“静止”的，故称其为“静止无功功率发生器”。又由于在各种系统电压下，静止无功功率发生器都能产生额定电流，这与电容器不同，电容器在低电压时电流也成比例降低。这种能发生额定电流的性能很近于同步调相机，因此又称为静止型同步调相机 (STATCON)。

随着工业生产过程的迅速发展，电网中的功率需求发生急剧变化，特别是冲击性的负载日益增多（如大型轧钢机、电气化机车、功率变流装置等）。这类用电设备往往启动过程快，启动频率高，频繁地吸收大量动态无功功率，引起母线电压的快速波动，给电网的稳定带来极为不利的影 响。SVG 将自换相桥式电路通过电抗器并联在电网上，适当地调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值，或者直接控制其交流侧电流，就可以使该电路吸收或发出满足要求的无功功率，实现集动态补偿感性无功功率和容性无功功率于一身。SVG 的另一个特点是，能够动态补偿大范围快速变化的瞬时无功功率。因此 SVG 得输出性能非常优越，它可以实现 3 大功能：在稳定

状态下，维持系统电压不变，或按要求调压；在稳定状态下，维持系统某处的无功功率最小，或按经济等要求调节无功功率量；在动态或暂态状态下，按系统稳定性的要求，调节无功功率量以提高稳定极限或抑制某个方式的震荡。

正由于 SVG 具有上述优点，因而作为一种新型的无功功率补偿调节装置，已经成为现代无功功率补偿装置的发展方向，成为国内外电力系统行业的重点研究方向之一。

(4) 统一潮流控制器 (UPFC)

统一潮流控制器 (UPFC) 的概念是由美国西屋科技中心的电力专家 L.Gyugyi 博士于 1991 年提出的。它是由一台静止无功功率发生器 (SVG) 和一台静止同步串联补偿器 (SSSC) 复合而成的具有一个共同统一的控制系统的新型潮流控制器。静止同步串联补偿器是指通过向系统串入一个幅值可调、几乎接近正弦的电压分量而实现补偿的，其核心部分采用大功率电力电子器件 (GTO) 组成的自换相的电力半导体桥式变流器的电力装置。由于静止同步串联补偿器串入的电压分量和线路的电流几乎是正交的，因此它可以模仿电抗器和电感器的动态行为。静止同步串联补偿器的主电路结构与静止无功发生器类似，区别在于静止无功发生器是并入电网的，而静止同步串联补偿器是串联在电网中的，且通过变压器串接入线路中。静止同步串联补偿器在串入线路中可以等效成电压源，其输出的是与串入线路的电流幅值无关的电压量。通过控制换流器，连续改变其输出电压的幅值和相位，从而改变线路两端的电压 (幅值和相位)，即它不仅能够超前系统潮流以容性方式运行，也可以滞后系统潮流以感性方式运行。在过补偿线路上，能动态控制相位移，使系统潮流反向，实现对线路有功功率、无功功率潮流的控制。利用有源控制，可以在较宽的频率范围内阻尼系统的功率振荡，并阻尼与并联电容器有关联的次同步谐振现象的大系统振荡，达到提高系统暂态稳定极限的目的。由于统一潮流控制器集成了静止无功功率发生器和静止同步串联补偿器，因此统一潮流控制器的功能非常强大，主要包括：能分别或同时对电力系统的有功功率、无功功率、电压进行控制和调节，可以对交流输电系统进行实时控制和动态补偿，提供多种补偿功能，优化系统运行，提高系统暂态稳定性和运行质量；实现对输电线潮流的准确调节，提高输送能力，保障系统的暂态稳定性以及阻尼系统振荡，为解决电能传输所面临的问题提供了新的手段和方法；在传统的电能传输框架内，统一潮流控制器可实时地对电力系统的基本参数 (输电电压幅值、相角和输电线路阻抗等) 同时或分别进行控制；可以独立作为并联或串联无功功率补偿器，也可以作为电压调节器、移相器和潮流控制器等。

综上，统一潮流控制器具有非常明显的优越性。它将一个由晶闸管换流器产生的交流电压串入并叠加在输电线相电压上，使其幅值和相角皆可连续变化，从而实现线路有功功率和无功功率的准确调节，并可提高输送能力以及阻尼系统振荡。统一潮流控制器能够同时或者有选择地提供串联补偿和相角控制，通过串联电压的注入在其内部产生必需的全部无功功率，并使其实现潮流控制。在没有附加的功率硬件的情况下，可通过注入同相电压实现电压调节。统一潮流控制器能够为线路提供与注入串联电压的无功功率要求无关的可控制并联无功功率补偿。统一潮流控制器

的输出是连续可变的快速响应，因此它能够最佳地控制线路阻抗，并且能够利用现有的串联电容器阻尼次同步震荡，还能反转其输出，以提供串联的感性补偿，以便减少线路上过多的电流。在技术上，统一潮流控制器可轻易处理几乎全部的潮流控制和输电线路的补偿问题。

(5) 有源电力滤波器 (APF)

有源电力滤波器 (APF) 是由全控电力电子器件构成的采用 PWM 控制的变流器，提供与补偿电流 (或电压) 大小相等、极性相反的电流 (或电压)，以抑制负载所产生的有害电流 (或电压) 在电力系统中传播的主动式综合补偿装置。对有源电力滤波器也可以这样定义：将电网中所含有害电流 (高次谐波电流、无功电流及零序负序电流) 检出，并产生与其相反的补偿电流，以抵消输电线路中的有害电流的半导体电力变流装置。变流装置在检测系统的控制下将直流电能转变为有害电流源所需要的能量，或者说，补偿装置所产生的电流波形正好与系统有害电流的频率幅值完全相同，而相位正好相差 180° ，从而达到了补偿或抵消有害电流的效果。因此同样地，有源电力滤波器由交流环节和直流环节组成，交流环节与系统相连接，有源电力滤波器先将系统的交流电能经变流器转换成直流并保存在直流侧的储能器内，同时直流侧的电压电流经过变流器变成交流电压电流输送到系统。有源电力滤波器是目前唯一能够全面动态补偿广义无功功率的补偿装置，还能补偿三相不对称功率和基波正序无功功率。因此有源电力滤波器借助适当的电路结构与控制技术，可以分别用于高次谐波补偿、基波正序无功功率补偿、三相不对称补偿、点电压稳定补偿、线路两端之间的电压差补偿，及单位功率因数补偿任何项的组合。

发展有源电力滤波器的思想早在 1967 年就被提了出来。上世纪 80 年代后，由于电力电子器件和控制技术的发展，APF 技术逐渐走向成熟。上世纪 90 年代 APF 技术进入实际应用，日本、美国在这方面处于领先地位，已有 500 多台 APF 投入运行，其总容量已达 60MVA。从使用的主电路形式来看，APF 的主电路分为电压型和电流型，目前使用的装置 90% 以上为电压型。从与补偿对象的连接方式来看，有源电力滤波器可分为并联型、串联型和串并联型，以及有源电力滤波器与无源 LC 滤波器混合使用的混合型。

我国在 APF 方面的研究起步较晚，直到 1989 年才见到这方面的研究文章，1993 年才见到试验性的工业应用实例。近年来我国对 APF 研究掀起了一个小高潮，涌现出大量的研究文献，很多高等院校与研究机构相继推出试验样机，但是目前除少量 APF 已投入工业试运行外，大部分尚处于完善阶段。

有源电力滤波器与其他补偿装置相比，具有很多优点：对频率和大小都变化的谐波能实现动态补偿，并能跟踪补偿各次谐波，自动产生所需要的变化的谐波，对补偿对象的变化有极快的响应；不仅能补偿各次谐波，还可抑制闪变、补偿无功；滤波补偿特性不受系统阻抗的影响，不容易和电网阻抗发生谐振，能跟踪电网频率的变化，可消除与系统阻抗发生谐振的危险，还能跟踪电网频率的变化，补偿性能不受电网频率变化的影响；补偿方式较灵活，即可对多个谐波和无功源集中补偿；具有自适应功能，可自动跟踪补偿变化着的谐波和无功功率；不受系统运行方式影

响和对系统运行的影响都比较小；可连续调节且响应迅速，即使补偿对象电流过大，有源电力滤波器也不会发生过载，并能正常发挥补偿作用；补偿无功功率时不需储能元件，补偿谐波时所需的储能元件容量也不大，因此体积小，可大大减少占地面积；从功率角度，可以将有源滤波器看作一种为负载提供谐波功率流动通路的装置，可以将谐波功率转换为系统基波功率，理想情况下本身并不消耗功率，因此其运行效率高于串联 LC 滤波器。

3.3 本专题发展的新方向和值得关注点

3.3.1 国内外相关技术现状

我国关于智能电网方面的研究进展缓慢，甚至是刚刚起步。2007 年 10 月，华东电网公司启动了智能电网可行性研究项目，密切跟踪国际先进电力企业和研究机构对智能电网的研究，并结合华东电网的现状和今后发展的要求，提出了 3 个阶段的发展思路和行动计划—2010 年初步建成电网高级调度中心，2020 年全面建成具有初步智能特性的数字化电网，2030 年真正建成具有自愈能力的智能电网。争取在智能电网建设的方向上取得实质性的突破，为早日实现“一强三优”现代公司做出贡献。

2008 年，国家电网公司开始推行电力用户用电信息采集系统，规划用 3~5 年时间实现全网的电能信息采集，实现“全覆盖、全采集、全预付费”的目标，这将为智能电网的集成通信系统提供一个非常强大的信息网络平台，保证了数据的双向实时高速传递，为智能电网的下一步推行奠定了充分的基础。

2009 年 5 月举行的特高压输电技术国际会议上，国家电网公司正式对外界公布了“坚强智能电网”计划。

我国将根据自己的国情，抓住机遇，寻找适合中国特色的智能电网战略规划，并尽快实施。

2001 年，美国电力科学研究院创立了智能电网联盟，推动“IntelliGrid”研究。该研究项目有两个目标：一是分析出电力系统运行的商业需求，包括现在、未来的各种需求，如自愈电网概念等；二是以基于这些分析得出的电力系统的需求为基础，提出支撑未来电力系统的信息需求系统，使用战术性的方法来建立一个战略视图，一个战略的高度建立一个不依赖于具体技术的视图框架。这两个目标明确了未来电力系统是一个融合两种基础设施（电力输送能源基础设施和信息）的能源系统。这两种基础设施的融合表明，未来的能源系统必须在两个方面同时进行。

为了使美国电网实现现代化，保证经济安全和国家安全，美国能源部（DOE）于 2003 年发布了“Grid2030”，对美国未来电网远景进行了阐述。DOE 于 2004 年又进一步发布了“国家输

电技术路线图”，为实现“Grid2030”进行战略部署。在这两份文件以及工业界的指导下，2004年在DOE支持下，电网智能化项目启动。

2004年欧盟委员会启动了相关的研究与建设工作，提出了在欧洲要建设的智能电网的定义。2006年欧盟理事会的能源绿皮书《欧洲可持续的、竞争的和安全的电能策略》明确强调欧洲已经进入一个新能源时代，智能电网技术是保证欧盟电网电能质量的一个关键技术和发展方向。实际上欧洲电网属于分布发电与交互式供电的发展模式，更适宜建立智能电网。因此，智能电网在英国、法国、德国等都有潮流性发展趋势。

在电能质量控制方面的研究和应用方面，国外一些发达国家已取得显著的成效，从实用的功率理论的扩展，到电能质量评价指标体系的建立；从广泛的电能质量普查，到对用户电能质量的监测等，已建立和形成了常务性机制。对各种电能质量问题的分析方法，及电能质量控制技术和装置，已深入进行了研究、开发和应用。对电能质量指标的评价体系，国外已做了大量的研究，如评价电能质量的好坏。通常的评价指标包括电压标准、谐波畸变率、功率因数等，但当波形为非周期信号、频率为分数次谐波时，上述评价指标就可能出现不协调的问题。这就涉及到如何处理畸变及对不平衡现象的功率定义问题。针对这类电能质量问题，国外已研究和开发出许多相对应的治理和改善电能质量的设备与装置，包括有源电力滤波器、电磁储能系统、配电静止同步补偿器、电能质量调节器等。

在日本，有源电力滤波器的使用已很普遍，并联型有源电力滤波器的最大容量已达50MVA，用于抑制电弧炉引起的电压闪变。西门子公司已系列生产出改善电能质量（PDQ）的电能质量调节器装置（SIPCON），其换流器采取基于绝缘栅双极晶体管（IGBT）的脉宽调制技术（PWM），它利用并联型有源滤波器和串联型有源滤波器进行组合，与系统联接有3种方式：并联运行时，主要防止非正常负荷产生的谐波、无功、负荷不平衡机闪变对系统的影响；串联运行时，主要用于系统电压突变、电压畸变或不平衡对负荷的影响；串并联运行时，具有双向补偿的功能。日本关西电力公司与三菱电机公司共同研制并于1980年1月投运了世界上首台静止同步补偿器（STATCOM）的样机，它采用了晶闸管强制换相的电压型逆变器，容量为20MVA。1986年10月，由美国国家电力研究院和西屋公司研制的±1MVA的STATCOM装置投入运行，这是世界上首台采用大功率GTO作为逆变器元件的STATCOM装置，于1991年在犬山变电站投运。美国国家电力研究院与田纳西电力局、西屋电气公司合作，在TVA电力系统的Sullivan500kV变电站建造了±100MVA的STATCOM装置，于1996年10月投运。1993年3月东京电力分别与东芝公司和日立公司开发的2台50MVA的STATCOM装置在东京所属新信浓变电站投入使用。

1997年，德国西门子公司将开发研制的8MVA的STATCOM装置安装在丹麦的Rejsby Hede风场。

3.3.2 天津水利电力机电研究所在提高电能质量方面工程举例

(1) 固定补偿滤波项目

内蒙古通顺铝业有限公司12万t/年电解铝技改工程中，电解铝为4机组整流，在投运补偿滤波装置前，其公共连接点功率因数为0.87，且谐波电流超出国家标准规定限值，由于其特征谐波为5次、11次和13次谐波，我所根据其运行的特点，每机组设置5次单调谐支路和11次高通补偿滤波支路，补偿容量达到43Mvar，投入补偿滤波装置后，公共连接点功率因数达到0.95，谐波电流低于国标规定的限值，获得了用户的好评。



图5 通顺铝厂四机组补偿装置

内蒙古霍煤鸿骏高精铝业有限公司为3机组整流方式运行，在投运补偿滤波装置前，其公共连接点功率因数为0.88，且谐波电流超出国家标准规定限值，由于其特征谐波为5次、7次、11次和13次谐波，我所根据其运行的特点，设置5次、7次单调谐和11次高通补偿滤波支路，补偿容量达到6.3Mvar，投入补偿滤波装置后，公共连接点功率因数达到0.93，谐波电流低于国标规定的限值，获得了用户的好评。



图 6 通顺铝厂四机组补偿装置

四川启明星铝业有限责任公司 12.5 万 t/年电解铝技改项目中，原补偿滤波装置是由另外一家公司提供，只设置了 7 次单调谐支路和 11 次高通滤波支路，但投运后发现 5 次谐波电流偏大，且对电解铝整流装置产生了谐振，严重威胁到了供电和生产安全。通过对其运行情况的仔细分析，我所提出技改方案，将原 7 次单调谐支路改为 5 次单调谐支路，并增设 7 次单调谐支路，通过这次技改，谐振现象消失，且 5 次谐波电流满足国家标准限值，并得到的用户的好评。

广西百色银海铝业有限责任公司二期电解铝扩建工程中，由于是 4 机组整流，导致 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波电流过大，并且使电网公共连接点的电压畸变率超过国标限值，经过分析计算，设置 5 次、7 次单调谐和 11 次高通补偿滤波支路，补偿容量达到 39.2Mvar，投入补偿滤波装置后，公共连接点功率因数达到 0.95，谐波电流低于国标规定的限值，并且获得了用户的好评。



图 7 广西百色银海铝厂补偿滤波装置

(2) 动态补偿滤波项目

天津普斯特金属有限公司是年产 5 万 t 钢铁的企业，由于其使用两台中频炉炼钢，导致电网谐波电流过大，致使周围其他电力用户设备烧坏，造成了极大的经济损失。经过对现场工况的仔细分析，我所技术人员做出了补偿滤波方案，并为该单位设计出了一套 TSC(动态补偿滤波装置)，TSC 装置是我所专门为负载变化较频繁，且谐波畸变率高的电力用户所设计的一款动态补偿滤波装置，该设备可以很好地跟踪负载的变化，达到滤除谐波，提高功率因数，改善电能质量的目的。投运后，谐波电流明显降低，并达到了国标要求，解决了频烧用电设备的问题，且提高了功率因数。



图7 天津普斯特金属有限公司动态补偿滤波装置

3.4 专家点评和对水平的分析

智能电网建设在我国起步较晚，理论研究和实践经验还不够丰富，而在提高电能质量方面，我国已跟踪国外先进技术多年，虽然在此领域我们还有很多工作要做，但最近数年，我国科技工作者已经取得了一定的理论和工程经验，并且我国电工行业迅速发展，培育出一批大型企业和集团公司，具备了先进电工设备的大规模生产制造能力和一定的设备研制、设计能力，整体技术水平有了长足的进步，设备国产化率不断提高。

在理论研究方面，瞬时无功功率理论已经建立，它为智能动态补偿滤波奠定了可靠的理论基础，这是电能质量方面的理论发展方向，今后我国科技工作者必将深入研究发展该理论。

在实践方面，由于我国电力建设的快速发展，对电能质量的要求也越来越高，所以对于补偿滤波设备的需求量较大，工程实践的机会也会增多，从而丰富了工程经验。

然而，我国电工设备制造业的核心竞争力仍有待提高。电工行业的整体研发水平较低，部分核心技术来源依靠国外，高科技含量产品与国际先进技术差距大，在自主知识产权、设计技术、

关键设备制造等方面均有待进一步提升。

3.5 对本专题发展的若干建议

智能电网的高级计量体系，主要靠双向数据传输达到配合用户门户网站、连接和协调智能电表、对户内可控设备进行优化控制的目的，我院的自动化所在水电站系统自动控制方面有丰富的经验和深入的研究，在自动控制方面有深厚的基础，而智能电网的高级计量体系需要海量的仪表类计量控制模块，此类产品目前在国内国际均未有成型产品，我院可以在此方面进行前期研究，掌握核心技术，作为新的经济增长点，防止国外产品技术垄断。

高级配电运行（ADO）相比传统的配网运行，其优点是提高可靠性，提高配电系统效率、电能质量和能源管理水平，提高资产管理水平和设备诊断能力，通过 DER（分布式电源）和需求响应达到更好地使用发电和配电资产。而想达到故障自愈，则需要大量的 DER（分布式电源）在系统中根据需要进行投入和切换，在电源投入的过程中，需要配备同样数量的并网同步装置，天津水利电力机电研究所曾经在水电站并网同步装置上取得研发成果并试运行成功，可以作为我院的一个定型产品。

DER（分布式电源）投切过程中需要大量的电力电子设备，而电力电子设备的使用会造成电能质量的下降，为达到保证电能质量的合格，需要投入谐波治理装置。天津水利电力机电研究所研制的谐波治理装置在 2004 年就被列入国家级火炬计划，在 2009 年和 2010 年，本院又陆续投入了科研经费进行深入研究，在未来的几年中，应建立相关的试验及生产与研发平台，开发适用于智能电网的谐波治理装置，使之成为新的经济增长点。

参考文献

- 1 Bernie Nelson. Looking to the sky for smart grid intelligence. PowerGrid International, 2010, 15 (6): 24~26
- 2 Gail Reitenbach. Smart grid: on the money. Power, 2010, 154 (4): 61~63
- 3 Klein, K. M, Springer, P. L, Black, W. Z. Real-time ampacity and ground clearance software for integration into smart grid technology. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (3): 1768~1777
- 4 Michael Pesin. Paving the way to the 21st century smart grid at seattle city light. PowerGrid International, 2010, 15 (6): 28, 30~31
- 5 Patricia Thompson, Michael Ozog. The value of the smart grid. Metering International, 2010, (2): 70, 72~75

- 6 Ray Bell. Safe smart grid design. SC magazine, 2010, 21 (2): 20
- 7 Vithal N Kamat. Smart grids. Electrical India, 2010, 50 (3): 96~103
- 8 R. Strzelecki, G. Benysec. 智能电网中的电力电子技术. 徐政译. 北京: 机械工业出版社, 2010
- 9 丁道齐. 复杂大电网安全性分析: 智能电网的概念与实现. 北京: 中国电力出版社, 2010
- 10 方廷. 智能电网特点及发展趋势. 云南电业, 2009 年第 7 期
- 11 傅书邈. 中国智能电网发展建议. 电力系统自动化, 2009 年第 20 期
- 12 李威. 智能电网发展形态探讨. 电力系统自动化, 2010 年第 2 期
- 13 王哲. 智能电网涉及的关键技术. 电源技术应用, 2009 年第 10 期
- 14 王智冬. 智能电网的评估指标体系. 电网技术, 2009 年第 17 期
- 15 王明俊. 自愈电网与分布能源. 电网技术, 2007 年第 6 期
- 16 王毅. 智能电网故障辨识系统设计研究. 华东电力, 2009 年第 6 期
- 17 杨宇, 李新超等. 智能电网中孤岛检测控制单元的研制. 电力建设, 2009 年第 9 期

负责人: 杨泽明

编写人员: 杨泽明、孙伟