

未来的用户电力技术

严干贵¹, 姜齐荣¹, 黄民聪²

(1. 清华大学电机系, 北京市 100084; 2. 澳门大学科技学院, 澳门)

摘要: 信息电力概念的提出凸显了供电质量对未来信息社会的重要性, 而如何保证社会可持续发展的能源供应和如何提高越来越庞大的现代电力系统的运行安全性、可靠性则是当今电力工业面临的新挑战。用于提高供电质量的动态电能质量调节技术、用于提高电能利用率及利用新能源的电能变换技术以及用于提高系统反事故能力的固态开关技术等 3 类用户电力技术, 将为解决以上问题提供有效途径。文中分析了上述各种技术产生的背景, 展望了这几种用户电力技术在我国的发展前景。

关键词: 用户电力技术; 电能质量; 动态电压恢复器; 超导储能; 固态断路器

中图分类号: TM761; TM92

0 引言

信息电力概念的提出呼吁人们注意动态电能质量问题对信息社会的严重危害性。随着负荷的不断增长, 如何保证社会可持续发展的能源供应并使电力生产满足越来越高的环保要求, 则是电力行业面临的又一主要难题。同时, 负荷的增长还使系统短路电流不断增加, 故障限流保护问题愈加突出。

传统机械式控制装置因其响应速度慢、控制不精确, 难以适应信息社会对电力供应的要求。随着大功率电力电子技术的飞速发展, 用户电力技术将为解决以上问题提供新的手段。文献[1]就信息电力的概念及 FACTS 和 DFACTS 技术在提高电力系统供电质量方面的作用做了较系统的阐述。本文在此基础上详细介绍了用于配电系统中的 3 类用户电力技术(亦称 DFACTS 技术), 即: 以动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, 缩写为 DVR)、配电网综合电能质量调节器(DS-UniCon)为代表的用于提高供电质量的动态电能质量调节技术; 基于超导储能的利用新能源的能量转换技术; 用于提高系统反事故能力的固态开关技术。本文最后讨论用户电力技术的发展方向。

1 动态电能质量调节技术

动态电能质量调节技术主要是指基于电压源或电流源型逆变器, 对配电系统的传输能力和供电质量等进行连续、快速、精确的有效控制, 是使现有供电质量提高到一个全新水平的有效手段, 主要包括串联式的 DVR、不间断电源(UPS)、并联有源滤波

器(APF)、DS-STATCOM 和串并联混合式的 DS-Unicon 等。本文主要介绍 DVR 和 DS-Unicon。

1.1 DVR

DVR 是用来补偿电压跌落、提高下游敏感负荷供电质量的有效串联补偿装置^[2]。如图 1 所示, DVR 主要由储能单元、脉宽调制(PWM)逆变器、滤波器和连接变压器等组成。为了保证 DVR 的快速响应特性, 逆变器一般由高频开关器件, 如 IGBT 或 IGCT^[2]组成。

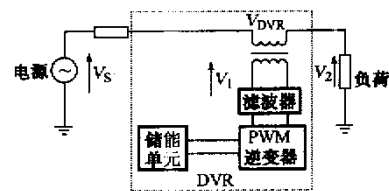


图 1 DVR 单线电路原理图

Fig. 1 One-line diagram of DVR

在正常供电状态下, 变压器的换流侧短接, DVR 处于低损耗备用状态。

当系统侧电压发生跌落或突增时, DVR 将做出响应, 迅速产生 3 个单相交流电压, 与接入的系统侧电压相串联, 补偿故障电压与正常电压之差。产生这些电压所需的有功和无功由 PWM 电压源逆变器提供, 逆变器由储能单元供电。每相电压的幅值和相角都可单独控制。根据电压相位的不同, DVR 控制分为同相电压补偿控制^[2]和最小能量补偿控制^[3,4] 2 种。前者控制补偿电压与供电端电压同相位, 其控制框图如图 2 所示^[2], DVR 输入端的三相电压(U_{abc})通过锁相回路转换为 U_d, U_q 分量。用故障前电压和实际电压 U_d, U_q 之差检测故障。在电压突降

时,利用锁相回路产生与故障前系统电压同相位的电压控制信号 U_{Bd} , U_{Bq} , 并调节 U_{Ba} , U_{Bb} , U_{Bc} 幅值,由 PWM 产生所需脉冲作用于逆变器。该控制结构相对简单,但补偿时所需能量比采用最小能量补偿控制时更多。

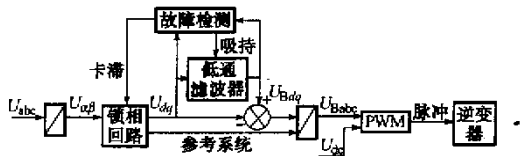


图 2 DVR 同相补偿控制原理图

Fig. 2 Block diagram of in-phase control of DVR

最小能量补偿控制是通过注入超前供电电压一定角度的补偿电压,以补偿馈电线路感抗压降,从而减小有功电压补偿分量,是使 DVR 注入补偿能量最小的一种控制方式^[3,4]。与上述同相补偿相比,在相同故障条件下该方法所需注入能量较少,因此持续补偿时间更长。但控制策略的确定与电压跌落深度、DVR 最大注入电压幅值、系统残余电压和系统参数等都有关,故控制结构比较复杂,并且采用该控制方式还会导致负载电压相位突变,因此对相位突变敏感的特殊负荷将产生不利影响。

由于大部分电压跌落约为额定电压幅值的 20%~30%,且持续时间一般为几百 ms 数量级,因此 DVR 的额定容量仅约为负载容量的 1/3,远小于采用 UPS 补偿时的设计容量,是保证大型敏感负荷供电质量的经济、有效手段^[2~8]。目前已有 MVA 级的 DVR 装置产品,它们在提高敏感负荷供电质量方面已取得了显著的成效。最近几年我国也已开展了 DVR 装置的研究^[6~8]。

1.2 DS-UniCon

基于电力市场化的发展,客户将可自由选择供电部门或公司,因此电能质量的综合补偿及调节便成为客户选择供电部门的依据之一。而现有解决电能质量问题的电力电子技术方案如 UPS, APF, 无功补偿器等都是基于解决其中某类特定问题而设计的,无法适应电力用户需求和电能质量问题本身的变化。分析现有各电能质量补偿器,不难发现它们都是用变流器、电容器或电池等综合而成,只是控制手段不同,因此需要研究新的、有效的控制手段,综合考虑现有配电系统的电能质量问题,才有可能予以综合解决。DS-UniCon 便是在该背景下提出的新的补偿装置系统^[9,10],图 3 是其单线电路原理图,主要由串、并联变流器模块和储能单元组成。

DS-UniCon 的串联变流器模块相当于一个

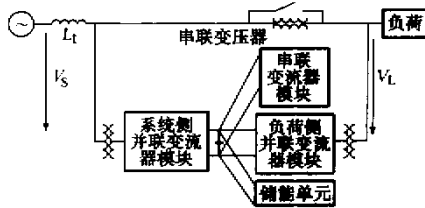


图 3 DS-UniCon 单线电路原理图

Fig. 3 One-line diagram of DS-UniCon

DVR。

DS-UniCon 的并联变流器模块相当于 APF,它不但可以抑制电网中谐波电流的来回流动,而且还可以改善电网功率因数和电流不平衡。其中补偿分量信号的检测和补偿分量的产生是影响其补偿效果的 2 项关键技术。

文献[11]提出的瞬时无功功率理论为实时检测谐波电流及无功分量电流提供了理论基础,它克服了传统方法中时延长、精度低、无法单独提取谐波分量和无功分量等缺点,大大促进了无功及谐波补偿的研究。但因其无法反映零序谐波分量,因此不适用于三相四线制系统的谐波电流检测。为了克服这一不足,文献[12]提出了更为完善的广义瞬时功率理论,其定义的各功率量在理想系统下不但与传统相应量的性质一致,而且当系统电压不对称或发生畸变时,其性质仍然成立,而且还可以推广到其他任意相电路,具有普遍的适用意义。

补偿分量的产生与逆变器的控制模式有关。现有的控制模式主要有基于电压源型的移相 SPWM 控制^[13]、空间矢量控制^[14]、滞环电流控制^[15]、间接电流控制^[16]、预估电流控制^[17]等。这些控制方式从各个角度提供了一般形式的控制方法,目的在于优化开关函数,减小直流侧的纹波。但这些控制方法大多为二维空间的 PWM 控制方案,不适用于三相四线制系统。为了补偿零序分量,现有的方法均是采用三相四桥逆变器,对 a, b, c 三相和零序分量分开考虑且独立补偿,而文献[18]提出的三维 PWM 控制则可利用三相三桥逆变器来解决三相四桥逆变器的零序补偿问题。并且,DS-UniCon 的储能单元和串联变流器模块还使并联变流器模块能有效补偿有功谐波电流和有功负序电流,实现了单个 APF 难以实现的功能。

因此,与单个 DVR 或 APF 相比,DS-UniCon 具有以下优点:

a. 以一个 DS-UniCon 代替现有的各种补偿器,不但可降低几个不同补偿器一起运作的成本及保养费用,而且还可实现单个分散式补偿器所无法

实现的功能。

b. DS-UniCon 与电力系统的监视控制和数据采集(SCADA)系统组合,可成为一个新的配电管理系统(DMS),以保证电力系统安全、经济和优质运行。

随着 PWM 控制技术向数字化、智能化方向的不断发展,DS-UniCon 的功能还将更加丰富,其成本也将随着功率元器件制造技术的不断进步而逐年下降,在未来电力系统中将具有很好的应用前景。

2 超导储能及其能量变换技术

为维持社会可持续发展,各种新能源将被逐步开发利用,且大多需经电力电子装置的变换使其非同步电能转换成同步的三相交流电能以供使用。超导储能(SMES)作为一种特殊新能源因其固有的诸多优点而引起广泛研究。基于电力电子的能量变换技术在 SMES 中的应用成果,必将对其他新能源的利用产生重要的借鉴意义,因此本文对 SMES 及其能量变换技术作一介绍。

2.1 SMES 的电力应用研究

20 世纪 70 年代初的能源危机大大促进了节能技术的蓬勃发展。其中,SMES 因其储能损耗低、储能密度大、适应于电力负荷峰谷调节而倍受青睐^[19]。SMES 的电力应用研究始于 1970 年基于格里茨桥的 SMES 系统的发明^[20],至今已有 30 多年历史。其中,从 1970 年至 1988 年为 SMES 电力应用的开创阶段,研发的目标是用于调节电力峰谷负载和提高输电系统的暂态稳定性^[20~23];从 1988 年至今为微小规模 SMES 技术趋于成熟并向多样化、实用化发展的阶段^[24~27]。

SMES 最初是考虑用于调节峰谷负荷而被引入电力系统,因大规模 SMES 系统(GW·h 级)几乎能随时跟踪负荷变化,使系统在恒输出条件下运行,可望产生巨大的经济效益。但其磁体线圈系统的设计具有相当大的难度,如为承受磁体间巨大洛伦兹力的磁体支撑结构设计^[19];为保证超导磁体快速充放电时的稳定性及超导线圈绝缘的安全性,需对超导线圈、磁体结构及其机电暂态性能进行深入研究^[28,29];为提高 SMES 转换效率,需开发低损耗电流引线、超导永久开关及低热漏的低温杜瓦容器等。并且,因功率器件的容量限制,几十 kV、几百 kA 甚至更高容量的功率调节系统成为限制 SMES 向大规模发展的又一瓶颈^[30~32]。由于存在以上技术难点,大规模 SMES 系统仍局限于概念性设计^[21,22],但用于调节负荷平衡却一直是 SMES 研究追求的目标^[28,32]。

SMES 的快速响应特性还使其可以用于提高电力系统的暂态稳定性^[20,23]。文献[23]介绍了容量为 30 MJ/10 MW 的小规模 SMES 用于抑制 0.35 Hz 的功率振荡,运行结果表明,SMES 装置能够在复杂电力系统中成功运行,且可有效提高输电线路的稳定极限。随后其他类似的工程试验研究也都取得了良好的效果^[33]。

小规模 SMES 工程试验装置的成功研制为此后微型 SMES 系统的产品化奠定了重要的技术基础,也为研制更大容量的 SMES 系统积累了工程经验。

随着西方电力工业的“放松管制”、电压跌落和瞬时供电中断等问题的日益严重,微型 SMES 得到蓬勃发展。它不仅可作为储能设备,而且还可作为可控有功电源参与电力系统的有功功率调节,使其用途更加广泛;并且高温超导材料的出现及应用简化了 SMES 系统的冷却手段,使其成本进一步下降,而在进行储能装置的经济评估时,不仅着眼于装置自身的价格,更重要的是着眼于避免电源中断而产生的损失,因此,微小型 SMES 系统在市场具有很强的竞争力。目前微小型 SMES 装置已趋于成熟,并已实现产品化,已在很多工业用户系统中投入应用^[24~27]。

2.2 微型 SMES 系统的工作原理

微型 SMES 系统的结构如图 4 所示,主要由超导磁体线圈系统和功率调节系统组成^[25]。

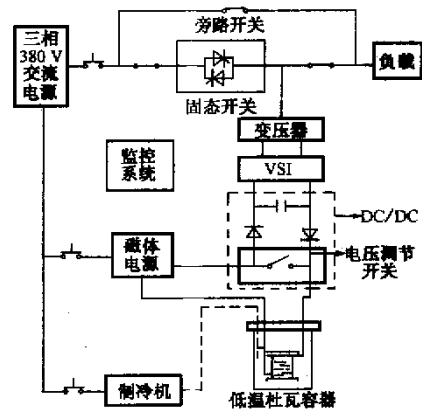


图 4 微型 SMES 系统结构示意图

Fig. 4 Simple block diagram of micro-SMES

超导磁体线圈系统由超导线圈、电流导引线、制冷机、低温杜瓦容器和磁体电源等组成,用于维持超导线圈的超导态和备用状态下超导线圈中的电流恒定。

功率调节系统是将超导线圈中的直流电能转换

成交流电能能量变换系统,由电流源型变流器(CSI)或电压源型变流器(VSI)、出口连接变压器及滤波器等组成。因CSI在与系统进行功率交换时需要吸收大量的无功,所以变流器的设计容量要远大于实际所需交换的最大有功功率^[31],故在SMES系统中已很少采用,而大多采用VSI^[24~32],并通过多重DC/DC斩波器来控制超导线圈对变流器的馈电及减小超导线圈的电流谐波。

图5为VSI型SMES系统的单相等值电路。

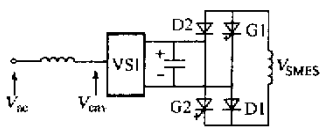


图5 VSI型SMES系统单相等值电路

Fig. 5 VSI single phase equivalent circuit of SMES

根据不同的用途,SMES采用不同的控制方法,但为了将超导线圈中的直流储能变换为与电网同步的交流电能,一般采用开关损耗较小的6脉冲多重化逆变控制,并在输出侧并联滤波器以滤除高次谐波。当以电网电压基波正序分量作为同步信号时,变流器输出线电压的基波分量为 $V_{cnv}(t)$ ^[34]:

$$V_{cnv}(t) = 1.103V_{dc}\sin(\omega t + 30^\circ + \alpha) \quad (1)$$

式中, α 为变流器的导通角。

因此,SMES系统提供给系统或负载的有功、无功功率分别为^[32]:

$$P = \frac{V_{cnv}V_{ac}\sin\alpha}{X} = \frac{0.78V_{dc}V_{ac}\sin\alpha}{X} \quad (2)$$

$$Q = \frac{V_{ac}(V_{ac} - V_{cnv}\cos\alpha)}{X} = \frac{V_{ac}(V_{ac} - 0.78V_{dc}\cos\alpha)}{X} \quad (3)$$

式中, V_{ac} 为电网友电压有效值; X 为变流器输出变压器的漏抗; $V_{cnv} = 0.78V_{dc}$,为变流器输出线电压的基波有效值。

由式(2)和式(3)可知,调节变流器的导通角及直流电容电压的幅值可控制变流器输出的有功和无功功率。而SMES对变流器的馈电可通过控制DC/DC斩波器中GTO的占空比(导通时间/开关周期)来实现。在一个开关周期内斩波器两端的电压、电流平均值与GTO的占空比有如下关系^[32]:

$$V_{SMES} = \left(1 - \frac{2}{A}\right)V_{dc} \quad (4)$$

$$I_{dc} = \left(1 - \frac{2}{A}\right)I_{SMES} \quad (5)$$

式中, V_{SMES} 、 I_{SMES} 分别为超导线圈的端电压及端电流; V_{dc} 、 I_{dc} 分别为VSI直流侧的电容电压及电流; A

为GTO的占空比。

由式(3)和式(4)可知,当 $A=0.5$ 时,超导线圈端电压及VSI直流侧电流的平均值都为0,无有功输出;当 $A>0.5$ 时,超导线圈处于充电状态;当 $A<0.5$ 时,超导线圈处于放电状态。

因此,综合式(2)~式(5)可知,协调控制变流器和DC/DC斩波器可实现SMES的四象限运行,使其既可用于抑制输电系统的功率振荡,提高电网的稳定性,又可用做动态电能质量控制器,提高配电系统的供电质量。

2.3 SMES技术的优点和关键问题

SMES与蓄电池储能、飞轮储能等相比,具有储能密度大、转换效率高(理论上高达95%以上)、可四象限运行、吐量大、充放电速度快等诸多优点,非常适合参与电力系统的有功功率调节。尤其是在能源分布很不平衡的地区,发展用于调峰的中大规模SMES系统对提高我国供电质量和运行安全水平都将具有重大作用。

目前SMES成本很高,如微型SMES系统的成本,约为350美元/kW,其中变流器约占总成本的60%^[27],但随着电力电子技术的不断发展,其成本将大幅度下降。

为降低SMES系统的成本,提高其性能,在今后研究中需着重考虑以下关键技术问题:①提高超导磁体的场强以提高其载流密度;②解决大型线圈的支撑材料及造价问题;③研制高电压、大电流的变流器以及高效、可靠的斩波器和滤波器;④研制有效、可靠的猝熄保护以解决磁体线圈断路后能量的释放和线圈温升问题;⑤研制低损耗的导引线 and 永久开关以提高SMES系统的效率^[33]。

3 固态断路器

3.1 固态断路器的特点

随着配电网容量的日益增大,系统的短路容量也持续增加,这对电网原有的和将投运的开关设备的开断能力都提出了更高的要求。同时,随着用户对供电质量要求的不断提高,如何快速切除短路电流以抑制故障期间电网电压的跌落在信息社会显得尤其重要^[1]。现有的传统机械式断路器因受其自身物理结构的制约,其开断容量很难有大幅度提高,并且动、静触头分开时引起的电弧延长了故障电流切除时间,使之难以满足一些电力用户对故障电流开断的速动性要求,因此如何限制、迅速开断故障电流显得日趋重要。

基于功率半导体开关器件的固态断路器因其卓越的电流关断性能使其自问世以来便引起广泛的关

注^[35~42]。随着电力电子功率器件的飞速发展,固态断路器所采用的功率元件及其主电路结构都经历了很大的变化,但用于 6 kV 及以上电压等级系统的固态断路器大多采用 GTO 元件,其典型主电路结构如图 6 所示,图中氧化锌避雷器(MOA)和缓冲器(Snubber)电路用来吸收 GTO 换相时产生的过电压。正常运行时 GTO 导通,负荷电流从中流过;一旦检测到故障,控制系统向 GTO 门极发出关断脉冲,固态断路器可在几百 μs 内在故障电流没有上升到较大值前就予以切除,因此可有效抑制电网电压的跌落和大故障电流带来的一系列灾难性后果。

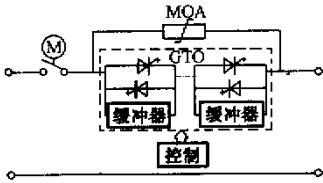


图 6 固态断路器结构示意图
Fig. 6 Block diagram of SSCB

固态断路器是 FACTS 和 DFACTS 技术实现对电力系统参数和网络结构快速、灵活、准确控制的关键设备,也是保障现代电力系统安全、可靠运行的重要设备。随着易于串并联、驱动功率小的大功率电力电子器件的出现^[37],固态断路器的关断容量有望得到较大的提高;随着混合式断路器和基于新型 SiC 材料的功率半导体器件制造技术的不断发展^[46],大功率固态断路器的通态损耗问题也将得到有效解决。我国在该领域起步较晚,应该加紧在这方面的研究。

3.2 固态断路器的技术难点

固态断路器在发展过程中,因受其以下固有缺点的制约,使其目前尚无法全面替代现有的传统机械式断路器^[35]:

a. 目前功率半导体器件的额定电压和额定电流较低,在高压电力电路中,需要采取多个 GTO 串并联的方式来提高固态断路器的开断容量及其可靠性,因此必须解决各驱动脉冲的同步控制问题,以保证各串并联运行的 GTO 在开通与关断时有较好的均压和均流特性^[39],否则压降不均或分流不均都将导致 GTO 元件的损坏,威胁整个串联模块的安全。但由于 GTO 关断时的增益很小,仅有 4 倍~5 倍,因此开断上 kA 的电流需要大幅值、陡上升率的门极驱动脉冲电流^[38,39],且随着串并联器件数的增多,控制这些脉冲的一致性触发难度很大。

b. GTO 的通态损耗大,目前大功率 GTO 的通态压降约为 3.2 V^[39],而机械式断路器的导通压降

仅为几 mV,因此太大的通态损耗使得固态断路器必须采取特殊的冷却装置^[37]才能保证安全可靠运行,这不但增加了其运行费用,而且还使装置复杂,降低了装置的可靠性。

c. GTO 的过载能力低,不能持续导通故障电流,而只能在故障电流到达其最大关断值前关断,因此固态断路器无法实现与下游断路器的整定配合^[41,42]。

由于存在以上缺点,固态断路器的应用范围受到很大的限制,一般只用于一些特殊的场合,例如产生大功率脉冲电源的开断装置^[37]、高压直流输电系统的接地转换断路器和一些重要负荷的转移开关^[35]。

3.3 固态断路器主电路结构

近 10 年来,现代电力用户对故障限流要求的不断提高大大促进了固态断路器的研制并取得了较大的突破,其主电路结构及功能都出现了新的变化,主要包括基于 GTO 的固态限流器、固态限流断路器和与传统断路器相结合的混合式断路器。

3.3.1 固态限流断路器及固态限流器

为了克服固态断路器无法与传统断路器整定配合的缺点,文献^[41]提出了如图 7 所示的由 GTO、SCR 和限流阻抗组成的固态限流断路器(SSCLB)。其中,GTO 为主开关,用于导通正常负荷电流;与之并联的 SCR 为辅助开关,正常运行时断开,故障时导通故障电流;限流阻抗可保证系统的故障电流低于 SCR 的开断容量,并可减轻下游断路器的开断压力。

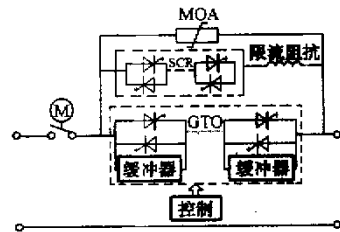


图 7 固态限流断路器结构示意图
Fig. 7 Block diagram of SSCLB

当检测到系统故障时,控制系统向 GTO 发出关断脉冲,GTO 关断后持续半个周期再重合,同时检测后续半个周期内的线路电流是否恢复正常,如果恢复正常则 GTO 维持导通状态。因此在这种情况下,供电中断时间最多为半个周期;如果故障仍存在,则 GTO 再次断开,同时 SCR 导通,限流阻抗支路投入运行,最终将故障电流限制在一定数值以下;10 多个周期后如果故障仍存在,则 SCR 断开,最终将故障切除。

如果省略图 7 中的 SCR 元件,则可构成结构简单但功能单一的固态限流器(SSCLD)^[43]。随着负荷容量的日趋增加和对供电可靠性要求的不断提高,该结构的固态限流器将具有更好的应用前景^[42]。

上述固态限流器及固态限流断路器都有效地改善了与下游断路器的配合问题,但是通态损耗问题依然存在,因此一般用于额定负荷电流较低场合。

3.3.2 混合式断路器

为了解决固态断路器的通态损耗问题,文献^[44]提出了将固态断路器与传统真空断路器相结合的用于 400 V 电力系统的混合断路器,其结构如图 8 所示^[44~46]。

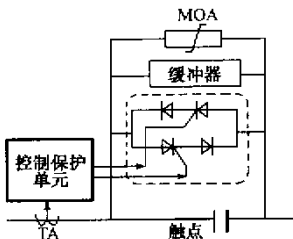


图 8 混合式断路器结构示意图

Fig. 8 Block diagram of hybrid circuit breaker

混合式断路器的工作原理是:当系统正常运行时,固态断路器断开,真空断路器闭合,完成导电通流任务;当系统发生故障时,由事故检测和控制回路向真空开关发出分闸脱扣信号,同时给 GTO 发出导通脉冲信号,随后,真空开关分闸,短路电流在电弧电压的作用下经过一定的时间全部转移至 GTO,然后 GTO 再断开。混合式断路器有效地结合了传统断路器通态损耗小、固态断路器开断速度快等优点。研究表明,该装置可在 1 ms 内将 60 kA 的预期故障电流限制在 10 kA 以内,限流效果非常显著,这不但减轻了故障电流带来的电磁应力和热应力,而且可使电压跌落在瞬间恢复,有效消除了电压跌落对其他负荷的影响。

上述断路器的缺点是:当真空开关断开时有电弧产生,这不但磨损了开关触头,影响真空断路器的寿命,而且较长时间的电弧电流转移既威胁着 GTO 的安全,又限制了 GTO 快速开断故障电流的能力。

由于存在以上缺点,文献^[47]提出了一种无电弧混合快速限流断路器,通过在主开关支路串联一个整流功率器件来抑制电弧的产生,但功率器件高通态损耗问题又再度出现。新近的文献^[48]提出用固态换相电路来延迟电流人工过零点时可能会出现暂态电压恢复,有效地实现了主开关无电弧开断

故障电流,保证了 GTO 开断故障电流的快速性。研究表明,该断路器可在 70 μ s 内将故障电流切除,有效地提高了固态断路器的限流水平和电网电压的恢复速度,但其开断电压仍很低。

4 结语

动态电能质量调节技术是使现有供电质量提高到一个全新水平的有效途径,也是电力工业实现市场化的必备支撑技术;电能转换技术是维持社会可持续发展、发展及利用新能源的关键技术,也是提高现有电能利用率的有效措施;固态开关技术是提高电网运行安全水平的有效实施手段。这几项用户电力技术将从各个方面促进我国电力工业的发展,因此需结合我国电力系统的实际情况,有的放矢地开展大量的基础研究,同时开展软硬件结合的、面向实用的开拓性工程研究,以便使这几项用户电力技术不仅在理论上而且在工程、工艺和可靠性方面得到全面发展。

参考文献

- 1 韩英铎,严干贵,姜齐荣,等(Han Yingduo, Yan Gangui, Jiang Qirong, et al). 信息电力和 FACTS & DFACTS 技术(Electric Power in Information Society and FACTS & DFACTS). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 20(19):1~7
- 2 Kevin Chan, Alexander Kara. 动态电压恢复器装置及其特性(Dynamic Voltage Restorer and Its Performance). 国际电力(International Electric Power for China), 1998(2):49~51
- 3 Vilathgamuwa D M, Ranjith A A D, Choi S S, et al. Control of Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer. In: IECON Proceedings, IEEE. 1999. 873~878
- 4 Choi S S, Li B H, Vilathgamuwa D M. Dynamic Voltage Restoration with Minimum Energy Injection. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1)
- 5 Woodley N H, Morgan L, Sundaram A. Experience with an Inverter-based Dynamic Voltage Restorer. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 1181~1186
- 6 黄翰(Huang Han). 单相动态电压调节器的研究:(硕士学位论文)(Study on Single-phase Dynamic Voltage Restorer, Thesis). 北京:清华大学(Beijing: Tsinghua University), 2001
- 7 Zhao Jianfeng, Jiang Ping, Li Naihu, et al. Study of Power Quality Compensators in Power System. In: Proc IEEE PEDS. Singapore: 1999. 1163~1167
- 8 丁洪发,段献忠,何仰赞(Ding Hongfa, Duan Xianzhong, He Yangzan). 一种用于不对称配电系统的新型动态电压恢复器(A Novel Dynamic Voltage Restorer for Unbalanced Distribution Systems). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2000, 20(11):46~50
- 9 Wong M C, Zhan C J, Han Y D. A Unified Approach for Distribution System Conditioning: Distribution System Unified Conditioner (DS-UniCon). In: IEEE 2 000 MW. Singapore: 2000
- 10 Wong M C, Han Y D, Zhao L B. Modeling of 3-D Tri-level Power Quality Conditioner. In: IPERC'2000. Beijing: 2000.

- 851~856
- 11 Akagi Hirofumi, Kanazawa Yoshihira, Nabae Akira. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components. *IEEE Trans on Industry Applications*, 1984, 20(3): 625~630
 - 12 Peng F Z, Ott G W, Adams D J. Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Four-wire Systems. *IEEE Trans on Power Electronics*, 1998, 13(6): 1174~1181
 - 13 Wahori M T, Kousaka K. Three-phase Current Source GTO Rectifier Adopting New PWM Control Techniques. In: *IEEE-IAS'89*. 1989. 585~590
 - 14 Habetler T G. A Space Vector-based Rectifier Regulator for AC/DC/AC Converters. *IEEE Trans on Power Electronics*, 1993, 8(1): 30~36
 - 15 Green A W, Boys J T. Hysteresis Current-forced Three-phase Voltage-sourced Reversible Rectifier. *IEE Proceedings Pt B*, 1989, 136(3): 113~120
 - 16 Dixon J W, Ooi B T. Indirect Current of a Unity Power Factor Sinusoidal Current Boost Type Three-phase Rectifier. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1988, 35(4): 508~515
 - 17 Wu Rusong, Devan S B, Slemon G R. A PWM AC-to-DC Converter with Fix Switching Frequency. *IEEE Trans on Industry Application*, 1990, 26(5): 880~885
 - 18 Wong M C, Zhao Z Y, Han Y D, et al. Three-dimensional Pulse-width Modulation Technique in Three-level Power Inverters for Three-phase Four-wired System. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2001, 16(3): 418~427
 - 19 Cesar A L. Superconducting Storage Systems: An Overview. *IEEE Trans on Magnetics*, 1996, 32(4): 2214~2223
 - 20 Boom R W, Peterson H A. Super-conductive Energy Storage for Power Systems. *IEEE Trans on Magnetics*, 1972, 8(5): 701~703
 - 21 Loyd R J, Schoenung S M, Nakamura T, et al. Design Advances in Superconducting Magnetic Energy Storage for Electric Utility Load Leveling. *IEEE Trans on Magnetics*, 1987, 23(2): 1323~1330
 - 22 Masuda M, Shintomi T. The Conceptual Design of a Utility-scale SMES. *IEEE Trans on Magnetics*, 1987, 23(2): 549~552
 - 23 Rogers J D, Boenig H J, Schermer R I, et al. Operation of the 30 MJ SMES Systems in the Bonneville Power Administration Electrical Grid. *IEEE Trans on Magnetics*, 1985, 21(2): 752~755
 - 24 Dewinkel C, Lamoree J D. Storing Power for Critical Loads. *IEEE Spectrum*, 1993, 30(6): 38~42
 - 25 Kalafala A K, Bascuflan J, Bell D D, et al. Micro Superconducting Energy Storage(SMES) System for Protection of Critical Industrial and Military Loads. *IEEE Trans on Magnetics*, 1996, 32(4): 2276~2279
 - 26 Schottler R, Coney R G. Commercial Application Experiences with SMES. *Power Engineering Journal*, 1999(6): 149~152
 - 27 Karasik V, Dixon K, Weber C, et al. SMES for Power Utility Applications: A Review of Technical and Cost Considerations. *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, 1999, 9(2): 541~546
 - 28 Arosy Aysen Basa, Wang Zhenyuan, Liu Yilu, et al. Transient Modeling and Simulation of a SMES Coil and the Power Electronics Interface. *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, 1999, 9(4): 4715~4724
 - 29 Hayakawa K, Nakano T, Minami M, et al. Development of Superconducting Magnet with Low Electric Power Loss for SMES. *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, 1993, 3(4)
 - 30 Casadei D, Grandi G, Reggiani U, et al. Behavior of a Power Conditioner for μ -SMES Systems Under Unbalanced Supply Voltages and Unbalanced Loads. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2. Slovenia*; 1977. 539~544
 - 31 Kustom R L, Skiles J J, Wang J, et al. Research on Power Conditioning Systems for Superconductive Magnetic Energy Storage (SMES). *IEEE Trans on Magnetics*, 1991, 27(2): 2320~2323
 - 32 Hassan I D, Bucci R M, Swe K T. 400 MW SMES Power Conditioning System Development and Simulation. *IEEE Trans on Power Electronics*, 1993, 8(3): 237~249
 - 33 周晓兰, 韩居华, 辛玲 (Zhou Xiaolan, Han Juhua, Xin Ling). 超导储能及其在电力系统中的应用研究综述 (Review of SMES Application in Power System). *电力情报 (Electric Power Information)*, 1999(1): 1~3
 - 34 Rashid M H. *Power Electronics: Circuit, Devices and Applications*. New Jersey: Prentice-Hall, 1993
 - 35 徐国政, 李庆民, 张节容, 等 (Xu Guozheng, Li Qingmin, Zhang Jierong, et al). 固态断路器的应用和发展 (Application and Development of Solid State Circuit Breaker). *高压电器 (High Voltage Apparatus)*, 1998, 34(6): 43~47
 - 36 Podlesak T F. On the Design of High Voltage, High Current Repetitive Opening Switches Utilizing Gate Turnoff Thyristors. In: *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. 1991
 - 37 Podlesak T F, Singh H, Fonda K, et al. Megawatt High Speed Solid State Circuit Breaker for Pulse Power Applications. In: *IEEE International Pulsed Power Conference, Digest of Technical Papers 2*. NJ (USA); 1993
 - 38 Podlesak T F, McMurray J A, Carter J L. Solid State Switch Utilizing GTOs in Series. In: *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. 1989
 - 39 刘文华 (Liu Wenhua). 基于 GTO 的新型静止无功发生器的系统分析与参数设计: [博士学位论文] (System Analysis and Parameter Design for GTO Based Advanced Static VAR Generator, Doctoral Dissertation). 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 1996
 - 40 刘文华, 胡雨辰, 刘炳, 等 (Liu Wenhua, Hu Yuchen, Liu Bing, et al). IGCT 和 IEGT——适用于 STATCOM 的新型大功率开关器件 (IGCT and IEGT——New High Power Silicon Switches Suitable for STATCOM). *电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems)*, 2000, 24(23): 66~70
 - 41 Woodley N, Sarkozi M, Lopez F, et al. Solid-state 13 kV Distribution Class Circuit Breaker: Planning, Development and Demonstration. In: *IEE Conference Publication 400*. London; 1994. 163~167
 - 42 Smith R K, Slade P G, Sarkozi M, et al. Solid State Distribution Current Limiter and Circuit Breaker: Application Requirements and Control Strategies. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1993, 8(3): 1155~1164
 - 43 Ueda T, Morita M, Arita H, et al. Solid State Current Limiter for Power Distribution System. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1993, 8(4): 1796~1801
 - 44 Genji T, Nakamura O, Isozaki M, et al. 400 V Class High-speed Current Limiting Circuit Breaker for Electric Power Sys-

- tem. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(3):1428~1435
- 45 苏方春, 李凯 (Su Fangchun, Li Kai). 电力电子技术在配电系统限流中的作用 (Application of Power Electronics in Distribution Systems). 高压电器 (High Voltage Apparatus), 1997, 33(6):43~44
- 46 杨钦慧 (Yang Qinhui). 6 kV 系统用高速限流装置及初步使用效果 (High Speed Current Limiter and Its Application in 6 kV System). 高压电器技术 (High Voltage Apparatus Technology), 1999(3):54~62
- 47 Yamaguchi S. Mechanical Arcless DC Circuit Breaker by Current Zero Operation. Rev Sci Instrum, 1992, 63(8):3993~3998
- 48 Zyborski Jacek, Lipski Tadeusz, Czucha Jozef, et al. Hybrid Arcless Low-voltage AC/DC Current Limiting Interrupting De-

- vice. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(4):1182~1187
- 49 王彩琳 (Wang Cailing). 电力半导体器件的最新发展动向 (The Tendency of Semiconductor Devices). 半导体情报 (Semiconductor Information), 1999, 36(1):27~32

严干贵 (1971—), 男, 博士研究生, 从事配电系统电能质量及高压变频控制研究。E-mail: gangui.yan@facts.ee. tsinghua.edu.cn

姜齐荣 (1969—), 男, 博士, 从事柔性电流输电系统及配电系统电能质量研究。

黄明聪 (1969—), 男, 博士研究生, 从事配电系统电能质量控制研究。

CUSTOM POWER TECHNOLOGIES IN THE FUTURE

Yan Gangui¹, Jiang Qirong¹, M. C. Wong²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Macao University, Macao, China)

Abstract: Proposition of the concept of information electricity stands out the importance of power quality issues due to the development of information ages. Moreover, how to guarantee sustainable energy provision and strengthen the reliability and safety of modern electric power system operation become more and more urgent. Three kinds of important custom power technologies that might provide novel solutions to dealing with these problems are described: DVR and DS-UniCon, SMES and solid state circuit breaker. Furthermore, backgrounds of custom power technologies are analyzed and their developing tendency is also reviewed in this paper.

Key words: custom power technology; power quality; dynamic voltage restorer (DVR); superconductivity magnetic energy storage (SMES); solid state circuit breaker (SSCB)

(上接第 34 页 continued from page 34)

于达仁 (1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为动力工程控制与仿真、动力机械故障诊断。E-mail: yudaren@hcms.hit.edu.cn

王西田 (1973—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为动力工程控制与仿真、机电耦合振荡的鲁棒非线性控制。

崔涛 (1976—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为动力工程控制与仿真。

DYNAMIC PARAMETER IDENTIFICATION OF THE STEAM TURBINE-GENERATOR BY LOAD REJECTION TEST USING DYNAMOMETRY METHOD

Yu Daren, Wang Xitian, Cui Tao

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: According to the known mathematic model of steam turbine-generator, the load-rejection test using dynamometry method is applied to dynamic parameter identification of steam turbine-generator after the parameters are analyzed in this paper. Moreover, whether the parameters can be identified separably is also discussed. Genetic algorithms are chosen as the identification algorithms with good result. The identified parameters can be used for dynamic characteristic analysis of such processes as speed runaway and so on, which is significant for improvement of technology and economic benefits of load-rejection test using dynamometry.

Key words: steam turbine-generator; dynamic parameter identification; load rejection test using dynamometry; genetic algorithms

作者: [严干贵](#), [姜齐荣](#), [黄民聪](#)
作者单位: [严干贵, 姜齐荣\(清华大学电机系, 北京市, 100084\)](#), [黄民聪\(澳门大学科技学院, 澳门\)](#)
刊名: [电力系统自动化](#) ISTIC EI PKU
英文刊名: [AUTOMATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS](#)
年, 卷(期): 2002, 26(1)
被引用次数: 45次

参考文献(49条)

1. [韩英铎;严干贵;姜齐荣](#) [信息电力与FACTS及DFACTS技术\[期刊论文\]-电力系统自动化](#) 2000(19)
2. [Kevin Chan;Alexander Kara](#) [动态电压恢复器装置及其特性](#) 1998(02)
3. [Vilathgamuva D M;Ranjith A A D;Choi S S](#) [Control of Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer](#)[外文会议] 1999
4. [Choi S S;Li B H;Vilathgamuva D M](#) [Dynamic Voltage Restoration with Minimum Energy Injection](#)[外文期刊] 2000(01)
5. [Woodley N H;Morgan L;Sundaram A](#) [Experience with an Inverter-based Dynamic Voltage Restorer](#)[外文期刊] 1999(03)
6. [黄瀚](#) [单相动态电压调节器的研究](#)[学位论文] 2001
7. [Zhao Jianfeng;Jiang Ping;Li Naihu](#) [Study of Power Quality Compensators in Power System](#)[外文会议] 1999
8. [丁洪发;段献忠;何仰赞](#) [一种用于不对称配电系统的新型动态电压恢复器](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2000(11)
9. [Wong M C;Zhan C J;Han Y D A](#) [Unified Approach for Distribution System Conditioning:Distribution System Unified Conditioner \(DS-UniCon\)](#) 2000
10. [Man-Chung Wong;Ying-Duo Han;Liang-Bing Zhao](#) [Modeling of 3-D Tri-Level Power Quality Conditioner](#) [会议论文] 2000
11. [Akagi Hirofumi;Kanazawa Yoshihira;Nabae Akira](#) [Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components](#) 1984(03)
12. [Peng F Z;Ott G W;Adams D J](#) [Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Four-wire Systems](#)[外文期刊] 1998(06)
13. [Wahori M T;Kousaka K](#) [Three-phase Current Source GTO Rectifier Adopting New PWM Control Techniques](#) [外文会议] 1989
14. [Habetler T G A](#) [Space Vector-based Rectifier Regulator for AC/DC/AC Converters](#)[外文期刊] 1993(01)
15. [Green A W;Boys J T](#) [Hysteresis Current-forced Three-phase Voltage-sourced Reversible Rectifier](#)[外文期刊] 1989(3)
16. [Dixon J W;Ooi B T](#) [Indirect Current of a Unity Power Factor Sinusoidal Current Boost Type Three-phase Rectifier](#)[外文期刊] 1988(04)
17. [Wu Rusong;Devan S B;Slemon G R A](#) [PWM AC-to-DC Converter with Fix Switching Frequency](#)[外文期刊] 1990(05)

18. [Wong M C;Zhao Z Y;Han Y D Three-dimensional Pulse-width Modulation Technique in Three-level Power Inverters for Three-phase Four-wired System](#)[外文期刊] 2001(03)
19. [Cesar A L Superconducting Storage Systems: An Overview](#)[外文期刊] 1996(04)
20. [Boom R W;Peterson H A Super-conductive Energy Storage for Power Systems](#)[外文期刊] 1972(05)
21. [Loyd R J;Schoenung S M;Nakamura T Design Advances in Superconducting Magnetic Energy Storage for Electric Utility Load Leveling](#)[外文期刊] 1987(02)
22. [Masuda M;Shintomi T The Conceptual Design of a Utility-scale SMES](#)[外文期刊] 1987(02)
23. [Rogers J D;Boenig H J;Schermer R I Operation of the 30 MJ SMES Systems in the Bonneville Power Administration Electrical Grid](#)[外文期刊] 1985(02)
24. [Dewinkel C;Lamoree J D Storing Power for Critical Loads](#)[外文期刊] 1993(06)
25. [Kalafala A K;Bascuflan J;Bell D D Micro Superconducting Energy Storage\(SMES\) System for Protection of Critical Industrial and Military Loads](#)[外文期刊] 1996(04)
26. [Schottler R;Coney R G Commercial Application Experiences with SMES](#)[外文期刊] 1999(06)
27. [Karasik V;Dixon K;Weber C SMES for Power Utility Applications: A Review of Technical and Cost Considerations](#)[外文期刊] 1999(02)
28. [Arosy Aysen Basa;Wang Zhenyuan;Liu Yilu Transient Modeling and Simulation of a SMES Coil and the Power Electronics Interface](#)[外文期刊] 1999(04)
29. [HayakawaK;Nakano T;Minami M Development of Superconducting Magnet with Low Electric Power Loss for SMES](#)[外文期刊] 1993(04)
30. [Casadei D;Grandi G;Reggiani U Behavior of a Power Conditioner for \$\mu\$ -SMES Systems Under Unbalanced Supply Voltages and Unbalanced Loads](#) 1977
31. [Kustom R L;Skiles J J;Wang J Research on Power Conditioning Systems for Superconductive Magnetic Energy Storage\(SMES\)](#)[外文期刊] 1991(02)
32. [Hassan I D;Bucci R M;Swe K T 400 MW SMES Power Conditioning System Development and Simulation](#)[外文期刊] 1993(03)
33. [周晓兰;韩居华;辛玲 超导储能及其在电力系统中的应用研究综述](#) 1999(01)
34. [Rashid M H Power Electronics:Circuit,Devices and Applications](#) 1993
35. [徐国政;李庆民;张节容 固态断路器的应用和发展](#)[期刊论文]-[高压电器](#) 1998(06)
36. [Podlesak T F On the Design of High Voltage,High Current Repetitive Opening Switches Utilizing Gate Turnoff Thyristors](#) 1991
37. [Podlesak T F;Singh H;Fonda K Megawatt High Speed Solid State Circuit Breaker for Pulse Power Applications](#) 1993
38. [Podlesak T F;McMurray J A;Carter J L Solid State Switch Utilizing GTOs in Series](#)[外文会议] 1989
39. [刘文华 基于GTO的新型静止无功发生器的系统分析与参数设计](#) 1996
40. [刘文华;胡雨辰;刘炳 IGCT和IEGT-适应于STATCOM的新型大功率开关器件](#)[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2000(23)
41. [Woodley N;Sarkozi M;Lopez F Solid-state 13 kV Distribution Class Circuit Breaker: Planning,Development and Demonstration](#) 1994

42. [Smith R K;Slade P G;Sarkozi M Solid State Distribution Current Limiter and Circuit Breaker: Application Requirements and Control Strategies](#)[外文期刊] 1993(03)
43. [Ueda T;Morita M;Arita H Solid State Current Limiter for Power Distribution System](#) 1993(04)
44. [Genji T;Nakamura O;Isozaki M 400 V Class High-speed Current Limiting Circuit Breaker for Electric Power System](#)[外文期刊] 1994(03)
45. [苏方春;李凯 电力电子技术在配电系统限流中的应用](#)[期刊论文]-[高压电器](#) 1997(06)
46. [杨钦慧 6 kV系统用高速限流装置及初步使用效果](#) 1999(03)
47. [Yamaguchi S Mechanical Arcless DC Circuit Breaker by Current Zero Operation](#)[外文期刊] 1992(08)
48. [Zyboriski Jacek;Lipski Tadeusz;Czucha Jozef Hybrid Arcless Low-voltage AC/DC Current Limiting Interrupting Device](#)[外文期刊] 2000(04)
49. [王彩琳 电力半导体器件的最新发展动向](#) 1999(01)

本文读者也读过(3条)

1. [冯源. 郭忠文. FENG Yuan. GUO Zhong-wen 固态断路器技术的应用](#)[期刊论文]-[电力自动化设备](#)2007, 27(10)
2. [杨艳芳 电网用高温超导储能磁体的失超保护研究](#)[学位论文]2009
3. [胡杰. 王莉. 穆建国 直流固态断路器现状及应用前景](#)[期刊论文]-[电工文摘](#)2010(2)

引证文献(45条)

1. [刘涛. 孙纯宁. 柴炜. 刘鹏. 齐俊斌. 刘哲谦 基于PSCAD仿真的DSTATCOM无功补偿研究](#)[期刊论文]-[中小企业管理与科技](#) 2010(30)
2. [郑冰. 王峰. 朱连成. 王玉峰 并联型APF补偿典型电流型谐波源负载仿真](#)[期刊论文]-[辽宁科技大学学报](#) 2009(4)
3. [祁峰. 王立杰 一种用于固态断路器的新型检测电路](#)[期刊论文]-[电气开关](#) 2007(3)
4. [王晓刚. 赵彩宏 一种用于配电网的综合补偿限流措施](#)[期刊论文]-[广州大学学报\(自然科学版\)](#) 2005(1)
5. [张锋. 张怡. 赵良 浙江电网自动发电控制的现状与对策分析](#)[期刊论文]-[继电器](#) 2005(10)
6. [金广厚. 李庚银. 周明 国内外电能质量控制水平及管理策略](#)[期刊论文]-[电力自动化设备](#) 2005(1)
7. [钟庆. 林凌雪. 易杨. 张尧. 武志刚 电压暂降评估指标\(I\)——电网薄弱环节指标](#)[期刊论文]-[电力系统及其自动化学报](#) 2012(1)
8. [严居斌 基于扰动功率法的短期电能质量扰动源判定](#)[期刊论文]-[四川电力技术](#) 2011(1)
9. [严居斌. 张正炜 基于扰动功率法的短期电能质量扰动源判定](#)[期刊论文]-[华中电力](#) 2011(2)
10. [祝恩国. 章欣 基于零电压转换的电能质量补偿设备直流储能单元电压控制技术](#)[期刊论文]-[低压电器](#) 2010(5)
11. [钟庆. 林凌雪. 易杨. 张尧. 武志刚 电压暂降问题蒙特卡罗仿真模型比较](#)[期刊论文]-[电力系统及其自动化学报](#) 2010(6)
12. [严居斌 基于扰动功率法的短期电能质量扰动源判定](#)[期刊论文]-[南方电网技术](#) 2010(5)
13. [齐玮. 张成效 动态电压恢复器补偿信号改进检测法](#)[期刊论文]-[山西电力](#) 2009(1)
14. [郑建勇. 梅军. 顾东亮. 饶莹. 吴恒荣 混合式转换开关换流电路设计与性能研究](#)[期刊论文]-[高电压技术](#) 2007(5)
15. [郑宏. 祁峰. 朱益华 AT89S51单片机在固态断路器中的应用](#)[期刊论文]-[微计算机信息](#) 2007(5)
16. [丁瑞昕. 朱连成. 王仲初 基于PWM控制并联型APF的MATLAB仿真研究](#)[期刊论文]-[微计算机信息](#) 2007(13)

17. [王晓刚](#), [陈丹菲](#) 有源等效阻抗限流器的研究[期刊论文]-[电气传动](#) 2007(3)
18. [龙云](#), [肖先勇](#) 新型动态电压凹陷校正器研究[期刊论文]-[电力自动化设备](#) 2006(6)
19. [桑林](#), [许晓慧](#), [李志明](#), [刘永相](#), [候兴哲](#) 非线性负荷扰动模拟系统设计*[期刊论文]-[电测与仪表](#) 2013(8)
20. [黄本润](#), [夏立](#), [吴正国](#), [周卫平](#) 线电压补偿型动态电压恢复器的双前馈加反馈控制策略[期刊论文]-[电力自动化设备](#) 2011(10)
21. [李金元](#), [赵国亮](#), [赵波](#), [张柯](#), [黄杰](#) 固态切换开关强迫切换策略研究[期刊论文]-[大功率变流技术](#) 2011(4)
22. [冯小明](#), [杨仁刚](#) 动态电压恢复器电压补偿策略的研究[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2004(6)
23. [王志群](#), [朱守真](#), [周双喜](#) Hilbert变换求取电压闪变有关参数[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2004(5)
24. [刘昊](#), [韩民晓](#), [尤勇](#), [肖湘宁](#) 线电压补偿型DVR的补偿能力分析[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2003(21)
25. [严干贵](#) 悬浮电容多电平逆变器的控制及其参数设计[学位论文]博士 2003
26. [杨戟](#) 直流固态断路器主电路拓扑结构设计与研究[期刊论文]-[低压电器](#) 2011(4)
27. [郭春林](#), [刘裕昆](#), [肖湘宁](#), [孙哲](#) 三单相型DVR的分析方法和补偿策略[期刊论文]-[电力自动化设备](#) 2011(12)
28. [钟庆](#), [林凌霄](#), [易杨](#), [张尧](#), [武志刚](#) 电压暂降评估指标(II)——设备停运概率指标[期刊论文]-[电力系统及其自动化学报](#) 2012(3)
29. [黄绍平](#), [浣喜明](#), [彭晓](#) 固态断路器的应用与仿真研究[期刊论文]-[高压电器](#) 2004(2)
30. [张秀娟](#), [李晓萌](#), [姜齐荣](#), [周金明](#) 动态电压调节器(DVR)的设计与性能测试[期刊论文]-[电力电子技术](#) 2004(2)
31. [向孟奇](#), [周强强](#), [焦彦军](#) 关于电能质量监测技术、控制水平及管理策略的探讨[期刊论文]-[电气技术](#) 2006(1)
32. [崔正洪](#) 配电网静止无功补偿系统的优化设计研究[学位论文]硕士 2006
33. [侯勇](#), [蒋晓华](#), [姜建国](#) 基于超导储能的并联处理不间断供电系统及其控制策略的研究[期刊论文]-[电网技术](#) 2004(16)
34. [和巍](#), [林涛](#), [崔一铂](#) 电能质量分析与控制策略综述[期刊论文]-[陕西电力](#) 2008(3)
35. [陈远华](#) 混合多电平逆变器的控制策略研究[学位论文]博士 2003
36. [葛荣良](#) 未来的固态变电站技术特点及应用展望[期刊论文]-[华东电力](#) 2007(5)
37. [金广厚](#), [李庚银](#), [周明](#) 电能质量市场的经济管理方法[期刊论文]-[中国电力](#) 2005(1)
38. [吕广强](#), [赵剑锋](#), [程明](#), [许扬](#) 配电网动态电能质量问题及其解决方案[期刊论文]-[高电压技术](#) 2007(1)
39. [韩民晓](#), [肖湘宁](#), [徐永海](#) 柔性化供电技术[期刊论文]-[电力系统自动化](#) 2002(8)
40. [吴彤](#), [涂光瑜](#), [杨小卫](#) 采用定制电力技术解决配电侧电能质量问题[期刊论文]-[高电压技术](#) 2005(9)
41. [金燕云](#), [罗毅](#), [涂光瑜](#) 配电系统电压跌落问题的研究[期刊论文]-[继电器](#) 2003(10)
42. [梅军](#), [郑建勇](#), [胡敏强](#), [柴继涛](#), [吴恒荣](#) 混合式限流断路器的研究与发展[期刊论文]-[继电器](#) 2004(20)
43. [谢小磊](#) 电压波动与闪变的小波分析[学位论文]硕士 2006
44. [袁川](#) 电压凹陷特征量实时检测和动态电压恢复器补偿方法的研究[学位论文]硕士 2005
45. [金广厚](#) 电能质量市场体系及若干基础理论问题的研究[学位论文]博士 2005

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_dlxtzdh200201015.aspx