

# 故障电流限制器的研究现状及展望

谢 炜, 李 欣, 戴朝波

(中国电力科学研究院 中电普瑞科技有限公司, 北京 102200)

**摘 要:** 概述了故障电流限制器的原理、种类以及关键技术, 介绍了国内外的故障电流限制器的研究现状及产品设备, 分析了故障电流限制器在城市电网应用的技术要求, 并根据城市电网应用的需求提出现有故障电流限制器的改进思路; 研究了故障电流限制器在风电场和分布式新能源接入系统中应用的需求和前景, 并对故障电流限制器未来的研究发展进行了探索。

**关键词:** 故障电流限制器; 城市电网; 风电; 分布式能源

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)04-0017-05

## Research Status and Perspective of Fault Current Limiter

XIE Wei LI Xin DAI Chao-bo

(China EPRI Science & Technology Co., Ltd., China Electric Power Research Institute, Beijing 102200, China)

**Abstract:** It summarizes the theory and categories of fault current limiter (FCL) as well as its key technologies, describes the research status and products of FCL both in China and abroad. Technical requirements of FCL in urban grid application are analyzed, upon which the improvement ideas of FCL are further proposed. Moreover, the requirements and prospect of FCL in wind farm and application of distributed new energy connecting with the system are researched, and the future development of FCL is also explored.

**Key words:** FCL (fault current limiter); urban power grid; wind power; distributed energy

## 0 引言

人口密集城市中的电网需要承受较大的负荷。商业发展、新建住房的增加和现有住房的改造导致城市电网的扩容, 而家用电器和电子产品等用电设备的增加造成了传统负荷的增大。负荷总量和负荷密度的持续增大致使各个电压等级上短路电流水平不断增加, 一旦短路电流达到甚至超过了断路器的遮断容量, 则严重威胁电力系统的安全运行, 会造成故障线路中的相关设备损坏, 后果严重。故障电流限制器(FCL)是现阶段解决系统短路电流超标问题的一种切实可行且经济的手段。

## 1 FCL 原理及技术特点

### 1.1 理想FCL的功能和特点

系统正常工作时, FCL不影响系统潮流; 在系统故障时, 投入限流装置, 限制短路电流。

理想FCL的特点是<sup>[1-4]</sup>: 稳态时等效为“不存在”, 即FCL本身零电压降落; 在电流的第一个周期内识别故障电流, 而且在几个周期内把故障电流减小到合理的范围之内; 在短时间内可以对连续故障进行动作, 不需要人为干预, 故障结束后自动恢复到故障之前的状态; 对电压和功角稳定性无影响; 可以在输电线路电压等级下工作; 不影响继电器和断路器的正常工作; 小型化、可移动、轻便且免维护。

### 1.2 各类FCL原理及技术特点

已经实施或者提出的FCL方案可以大致分为超导型故障电流限制器(SFCL)、无谐振型故障电流限制器、

收稿日期: 2011-05-10

作者简介: 谢炜(1985-), 男, 硕士, 主要从事电力系统仿真分析研究。

并联谐振型故障电流限制器和串联谐振型故障电流限制器4类。SFCL利用超导材料阻抗随着温度变化的特性来限制故障电流,其关键技术是超导材料的研制和故障电流检测系统、冷却系统等其他设备。无谐振型、串联谐振型和并联谐振型FCL都使用了限流电抗器和开关设备(机械开关或者电力电子开关器件),3种方式限流效果各异,其关键技术都在于开关设备的研制、故障电流检测系统以及控制保护系统等。

#### 1.2.1 SFCL

SFCL的基本原理是:稳态时,SFCL的超导材料呈低电阻特性<sup>[5]</sup>,允许电流通过且基本无电压降;故障时,电流突然增大,引起温度上升,导致超导材料的阻抗值突增,从而限制了短路电流。SFCL能在较高电压条件下运行,对故障作出快速响应,可在极短时间(百 $\mu\text{s}$ 级)内有效地限制故障电流,无需电子检测判别系统故障,是FCL发展的重要方向。

目前,SFCL技术尚不够成熟,还需附属制冷设备,且造价高。冷却技术的不成熟会导致频繁的故障,同时对超导材料的生产工艺要求很高,不易掌握<sup>[6]</sup>。SFCL失超后恢复时间过长,不适于需快速重合闸的场合<sup>[7]</sup>,且超导线圈饱和之后会产生谐波。

#### 1.2.2 无谐振型FCL

无谐振型FCL一般由固态开关器件和限流电抗器构成,能在电流尚未达到峰值的上升阶段就开始限制故障电流。图1示出一种无谐振型FCL的原理图。正常工作时,GTO导通,流过负荷电流,不影响系统运行;检测到故障电流后,GTO关断,电流移至电抗器上,从而限制故障电流<sup>[7]</sup>。

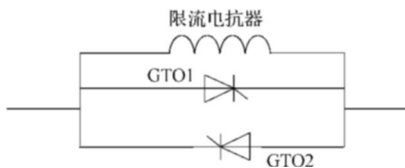


图1 无谐振型FCL原理图

Fig.1 Theoretical diagram of non-resonance type FCL

由GTO构成的固态开关能在10 ms内快速切断故障电流,避免了线路压降引起的敏感负荷跳闸,并在故障电流达到峰值之前将其限制。半导体元件关断过程中没有触头磨损,也没有电弧产生,因此比传统机械开关的噪声小且寿命长<sup>[8]</sup>。

#### 1.2.3 并联谐振型FCL

并联谐振型利用低阻抗的电容器和电抗器并联来限制故障电流。正常工作时,FCL处于非谐振状态,阻抗较小;检测到故障电流后,进入并联谐振(阻抗)状态,

线路阻抗增大,从而限制短路电流<sup>[7]</sup>。图2示出并联谐振型FCL原理图。

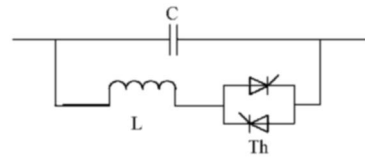


图2 并联谐振型FCL原理图

Fig.2 Theoretical diagram of parallel resonance type FCL

并联谐振型FCL不仅存在电容器的过电压问题,而且在故障保护期间,存在由电容器容抗和系统感抗引起的谐振电流问题<sup>[7]</sup>。如果限流器用于500 kV及以上电压等级的电网中承受系统主电压,其串联的电力电子器件数目将很大,造价高且可靠性低,因此在高压电网中基本不使用并联谐振型FCL。

#### 1.2.4 串联谐振型FCL

串联谐振型FCL利用旁路元件来限制故障电流。正常工作时,FCL处于串联谐振(阻抗接近零)状态;出现短路故障时,利用旁路元件使电路摆脱谐振,增大阻抗,达到限制故障电流的目的。图3示出串联谐振型FCL的原理图,主要由电容器、电抗器及旁路装置构成,实际应用时还需加装过压保护装置等。串联谐振型FCL结构简单,性能可靠,目前已在中压配电网中获得应用<sup>[7]</sup>。

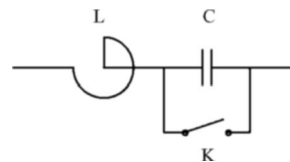


图3 串联谐振型FCL构成原理图

Fig.3 Theoretical diagram of series resonance type FCL

## 2 国内外FCL的研究现状

从事FCL研究的单位很多,国外公司如ABB和Siemens,还有很多的科研机构,如美国电力科学研究院、橡树岭国家试验室及相关各类大学;国内科研机构包括中科院电工所和中国电力科学研究院及相关各类大学(如浙江大学、山东大学和清华大学等)。到目前为止,各研究单位已提出了许多适用于各种电压等级的故障电流限制技术,其最高电压等级达到500 kV,国内的代表产品为浙江瓶窑500 kV FCL,国外则以美国南加利福尼亚的温森特500 kV FCL为代表。

FCL种类不同,其理论基础亦不相同,主要包括基于高温超导原理的FCL、基于电力电子的固态电流限制器和基于快速开关、间隙、避雷器、电磁驱动、金属汽化、电弧等原理的其它各种类型限流器。

在各种故障电流限制设备当中,目前技术成熟的

主要有限流电抗器、高压限流熔断器、谐振型FCL、串联补偿装置(兼有限流功能)等;尚处于研究阶段的主要有超导限流器、PTC限流器、液态金属FCL、应用电磁驱动原理的FCL、复合式FCL等。就现状而言,应用较为普遍的依然是一些传统技术,如限流电抗器、高压限流熔断器、Is-limiter等。其中限流电抗器是目前唯一可以应用于高压系统的限流技术,而高压限流熔断器和Is-limiter以目前的结构和工艺水平,主要应用于中低压系统中。对于研究阶段FCL,有的虽然在基础理论与应用研究方面取得了一些突破性进展,但距工程化应用还有相当长的距离。对于工程应用,特别是在高压电网的工程中应用,诸如冷却、绝缘、造价等基础性问题有待进一步研究。

近年来,随着柔性交流输电(FACTS)技术的日益成熟,特别是基于FACTS技术的电力电子装置在特高压电网中的成功应用,使得基于FACTS技术的限流器成为解决特高压电网中的故障电流限制问题的重要途径之一。如Siemens公司提出的基于晶闸管保护串联电容器(TPSC)技术的短路电流限制器(SSCL),就是FACTS技术在故障电流限制技术领域应用的一个典型示范。FACTS技术作为一种已经基本成熟的新技术,其可靠性可得到保证,同时FACTS设备性能已大幅提升,而造价却大幅降低,完全适合于商业应用。另外,基于FACTS技术的限流装置较易实现其它辅助功能的扩展,如抑制功率振荡,消除次同步谐振,实现无功补偿、潮流控制等。

## 2.1 国外FCL产品

以美国Silicon power公司的SSCL(Solid State Current Limiter)为例,它是目前国外最新的基于固态开关器件的无谐振型FCL,其电压等级分为15 kV和69 kV二种。SSCL的主体部分采用箱式设计,箱顶有接线柱用于接入母线,箱体一侧的通风系统用于箱体内部散热。该装置体积小,结构紧凑,适合城市电网应用。

图4中SSCL单组模块(虚线内)是一个无谐振型故障电流研制单元,其中限流电抗器、SGTO开关和MOV(金属氧化物限压器)相并联。MOV用于过电压保护。一旦主SGTO开关出现故障而不导通时,备用SGTO开关则导通,用以旁路限流电抗器。SSCL单组模块结构与无谐振型FCL基本类似,其原理也基本相同。

单组模块的控制电路直接对SGTO施加控制信号,以保证SGTO的开关动作准确无误。5个单组模块并联组成一个堆栈,可整体拆卸和移动,堆栈之间通过并联来改变流过的载流电流的大小。可通过拆卸更换限流电

抗器模块改变电感数值,通过模块之间相互并联达到合适的限流电抗值。通风管从箱体顶部抽出热空气,送入外部的通风系统进行散热,以避免箱体内设备的热故障<sup>[9]</sup>。

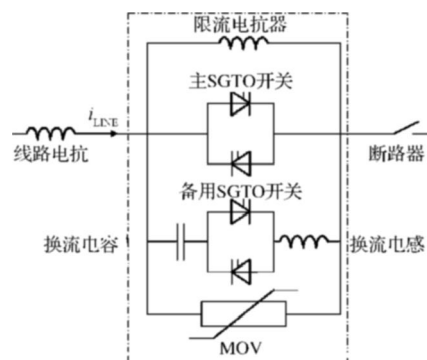


图4 SSCL单组模块电路图

Fig.4 Schematic diagram of SSCL's single unit

正常情况下,电流流过SGTO;一旦故障电流被高速传感器检测到并经FPGA确认,SGTO则被断开,电流即被转移到限流电抗器上,限流电抗器将电流水平限制在低于下游断路器的遮断等级范围,下游断路器将在30个周波内触发并断开电路。当故障被排除后,SSCL可自动或人工重置<sup>[10]</sup>。

SSCL适用于户外运行,可用于城市电网应用,其主要优点<sup>[10]</sup>为:低损耗、体积小、重量轻、安全可靠、可立即重合闸、线电流没有扰动且可以拓展所需的电压等级和电流等级(模块化结构)。

SSCL采用若干相同的故障电流限制支路并联结构,但存在大功率GTO并联动态不均流的问题。随着结温的上升,导通时间将缩短,而关断时间则有延长之势,增大了并联工作的GTO开关时间的差异,从而导致GTO开关损耗和温度的进一步上升,如此恶性循环,则会损坏器件。为了防止动态不均流现象导致SSCL故障,须增强系统散热功能并优化GTO门极控制电路的设计,生产时严格选择GTO开关参数,尽可能做到并联GTO同时导通和同时关断,这对SGTO器件质量、电路中器件选型和电路及控制系统的设计都提出了相当高的要求。

## 2.2 国内FCL产品

目前国内最成熟的FCL产品之一是浙江瓶窑500 kV串联谐振型FCL,其主电路如图5所示。正常工作条件下,电容器组补偿限流电抗器的感抗;当系统发生短路故障时,晶闸管快速导通,旁路电容器组,使限流电抗器发挥限流作用。金属氧化物限压器(MOV)用于电容器组的过电压保护,短路故障下,一旦晶闸管导通失败,电容器组电压将上升到危及电容器安全的水平,此

时MOV将迅速动作,而火花间隙是电容器组的过电压后备保护装置。旁路断路器在几十ms内实现电容器组的可靠短接,也为电容器组的投入和退出操作提供手段。阻尼回路用于限制电容器的放电电流,确保电容器组、晶闸管阀、火花间隙和旁路断路器的安全运行。旁路刀闸和隔离刀闸为系统操作及检修提供便利<sup>[11]</sup>。

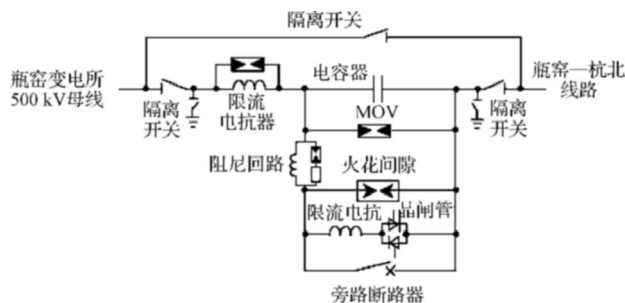


图5 瓶窑FCL主电路图

Fig.5 Main circuit diagram of Pingyao FCL

瓶窑500 kV FCL作为国内首次投运的限流器装置,已正常运行一年多,对开展城市电网FCL的研究有示范作用。此FCL采用MOV作为电容器过电压保护的主设备、火花间隙和旁路断路器作为MOV保护的后备保护措施,保证了装置的可靠动作;且控制保护系统采用了冗余配置,保证了监测触发系统的可靠性。但由此带来的主要问题是装置的主设备多,占地面积大,不适于城网用地紧张的情况;价格昂贵,整套装置的成本大,不能满足城网中对新投设备经济性的要求;主电路结构和控制系统复杂,运行维护不方便。因此,但若直接应用于城市电网,应改进其主电路。

### 3 FCL的应用

#### 3.1 在城市电网中

城市电网在迅速发展的同时,其短路电流水平也在不断增大。目前,国内外城市电网中依旧使用高阻抗变压器和串联电抗器来抑制故障电流,这些装置总体上使电网中断路器的关断维持在低于遮断容量的水平,但在不久的将来就可能显示出其遮断能力的不足。针对这一问题,最直接的方法就是采用更大遮断能力的断路器及其相应的设备,但可供选择的断路器品种有限,且这种解决方法所需要的高额成本令人望而却步,因此出现了各种各样抑制故障电流的设备和措施。目前,城市电网对FCL的需求迫切,但是FCL的应用必须综合考虑城市电网的安全性和经济性指标,面临城市人口密集、电网扩建受限的问题。因此,新建设备总体的要求如下:

##### (1) 电压等级

目前城市电网电压一般为110 kV,有时甚至提高到220 kV。因此,FCL的电压等级也需要相应地提高到110 kV以上。

##### (2) 遮断电流

随着城市电网的快速发展,主要母线或者馈线上的短路容量也急剧增加,要求城市电网的FCL具备更高的短路电流开断能力,一般在100 kA以上。

##### (3) 合闸时间

故障电流在故障发生后一个周波达到最大,在此之前若没能消除故障或没有通过一定方法使故障电流衰减,那么电网中的设备就将会承受很大的电流冲击,这对主要设备的动热稳定性都是很大的考验。因此,FCL必须能快速限制电流,具有快速触发及动作的装置。

##### (4) 占地面积

在土地紧张的情况下,要求尽量采用紧凑型设备,以减少新增设备的占地面积。

##### (5) 成本和经济性

电网中若投运新型设备,经济性是影响其能否被采用的重要方面。在城市电网中应用FCL,若成本过高,则可能被其他更经济的设备所替代。因此在提高FCL性能的同时,还要尽量控制造价。

##### (6) 设备安装调试

正常运行时,FCL对系统的运行方式及潮流分布影响不大。选址变电站除了应具有足够的空间用来安装设备之外,在进行设备安装、系统调试及试验时,应在不影响系统正常供电的前提下,尽可能方便操作。

对于串联谐振型FCL,为了提高动作速度、减小整个装置体积,考虑目前实际情况,能够改进的部分主要为过电压保护装置,尤其是旁路开关装置。采用不同的电容器旁路装置,就会得到不同的故障电流限制效果,可根据具体需要,选择合适的开关及旁路设备。

一些成熟的无谐振型FCL(如负荷开关-熔断器型FCL和混合式熔断器等),若其性能能够满足具体的系统需求,或在改进某些元件后即能满足具体需求,则仍可采用。

#### 3.2 在分布式新能源领域

分布式新能源装置体积小,布局紧凑,一般安装在负载附近,属于发电厂或者电力公司所有<sup>[12]</sup>。分布式新能源的接入导致系统潮流(正常运行情况)和短路电流(故障情况)的大小和方向发生改变,会对系统保护产生不利影响,特别是会对现有的继电保护配合系统带来比较大的影响<sup>[13-17]</sup>。其对电网的影响程度由自身的位置

置、技术类型和接入方式等决定,带来的主要问题是产生超出断路器遮断能力和熔丝容量的故障电流。采用FCL不仅可以限制故障电流、免除因开关改造和保护装置升级而产生的昂贵费用,而且还可提高电能质量、系统可靠性及系统设备的调度能力,并抑制变压器的涌入电流<sup>[16-21]</sup>。

我国已确定了在2020年之前实现由可再生能源提供12%的电力的目标,而风电已经成为发展最快的可再生能源之一。但与传统发电相比,由于风电的稳定性和可控性较低,大规模风电场的接入给电力系统带来很大的挑战,如大量风电场接入现有的配电网会导致故障电流水平超出现有开关的容量<sup>[22]</sup>。由于稳态的低损耗特性,FCL可以在输配电网中降低故障电流的水平。

在我国,风电场通常被接入35 kV/110 kV的配电网(较低短路电流水平)。在中压(MV)和低压(LV)配电网中,HV(高压)/MV或MV/LV变压器的短路阻抗实际上决定了上游电网故障电流的大小。为满足电压调节和电网总电能质量的要求,一般尽可能选择低短路阻抗。现有配电网的短路电流水平与设计值很接近<sup>[23]</sup>,为保证大规模风电接入后总故障电流水平低于电网设计值,就需要在风电场安装FCL。

国外的新能源发电基本以分散接入为主。我国资源状况与经济发展区域的逆向分布决定了新能源发电具有大规模集中接入的特点,短路水平将会更高,由此可见,以风电为代表的诸多分布式新能源的电网接入中,FCL的应用前景非常广阔。

## 4 FCL研究展望

SFCL能在较高电压下运行,可在极短时间(百微秒级)内有效地限制故障电流,是FCL未来发展的重要方向。但目前SFCL技术尚不成熟,还需解决电流整定困难、失超后的散热维护等问题<sup>[7]</sup>;需附属制冷设备,造价高;对超导材料的生产工艺要求很高,不易掌握。因此暂不考虑在城市电网中应用超导FCL。

由于电力电子技术,特别是大功率晶闸管串联技术的迅速成熟,基于电力电子技术的FCL是目前最有可能在故障电流限制技术方面很快得到广泛应用的技术方案。

并联谐振型电流限制器存在串联电容器的过电压问题或在故障保护期间由电容器容抗和系统电抗引起的谐振电流问题,且容量有限,实际中应用较少。因此无谐振型和串联谐振型FCL是目前发展的重要方向。在

无谐振型和串联谐振型FCL技术方案中,尽可能降低串联电力电子器件数目是提高故障电流限制器可靠性、降低造价的关键。其中,串联谐振型FCL与传统的限流电抗器技术之间存在着技术延续性,在进行方案设计时,不仅有可能实现传统的被动限流模式(即限流电抗器)与主动限流模式之间的自由切换,具有较高的灵活性,同时还可以大幅提高故障电流限制水平。同时,谐振型FCL还可以实现抑制功率振荡、次同步谐振等附加功能。

## 5 结语

本文对FCL的现状进行了研究,并对其未来的发展趋势进行了展望。故障电流限制装置在城市电网以及新能源接入系统中的需求显著,这些新的应用场合对FCL的发展起到了促进作用,同时电力电子技术及其他相关设备的发展也为FCL的改进提供了新的解决手段。

## 参考文献:

- [1] Tang G, Iravani M R. Application of a fault current limiter to minimize distributed generation impact on coordinated relay protection [C]// International Conference on Power Systems Transients (IPST '05). Canada:2005.
- [2] Leung E M. Superconducting fault current limiters [J]. Power Engineering Review, 2000, 20(30):15-18.
- [3] Karady G G. Principles of fault current limitation by a resonant LC circuit [J]. IEE proceedings, Part C: Generation, Transmission and Distribution, 1992, 139(1):1-6.
- [4] Sokolovsky V, Meerovich V, Vajda I, et al. Superconducting FCL: design and application[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2004,14(3):1990-2000.
- [5] Paul W, Chen M. Superconducting control for surge currents [J]. Spectrum, 1998, 35(5):49-54.
- [6] 李品德,刘军虎,王永红,等. 电力系统故障电流限制器的应用和研制现状[J]. 高压电器,2000(3):31-36.
- [7] 徐丙垠,李天友,薛永端,等. 智能配电网讲座:第五讲 柔性配电与故障电流限制技术[J]. 供用电,2010,27(1):20-25.
- [8] 赵强,张丽. 故障电流限制器现状及应用前景[J]. 电力建设,2008,29(1):44-47.
- [9] Sundaram A, Gandhi M. Solid-state fault current limiters (SSFCL) [C]//Annual DOE Peer Review Meeting. Washington DC, 2008.
- [10] Sundaram A, Gandhi M. Development of a test protocol for a 15kV class solid-state current limiter [C]//CIRED 20th International Conference on Electricity Distribution. Prague: 2009: 533.
- [11] 林集明,项祖涛,申洪. 华东500 kV超高压电网故障电流限制器基本设计与保护控制研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,2007.
- [12] El-Khattam W, Salama M M A. Distributed generation technologies, definitions and benefits [J]. Electric Power System Research, 2004, 71(2):119-128.
- [13] Brahma S M, Girgis A A. Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation [J]. Power Delivery, 2004, 19(1):56-63.

导致直流侧电压出现不平衡,我们参考超级电容中均压的方法,提出了一种控制总的有功电流,利用一个中间电容来均衡直流侧电容电压的方法并对其进行了仿真验证,仿真结果表明我们的方法是正确、可靠的。但该方法存在一些缺陷,首先,我们有功电流的控制方法会因为三相H桥之间参数的差异而使电网三相电流出现一定程度的不对称;其次,这种方法相对于不附加硬件电路的装置而言,会增加许多器件,提高了装置成本;最后,利用飞渡电容均衡直流侧电容电压会增加装置有功电流的消耗。如何解决这些问题,是我们后续研究的重点。总的来说,我们的方法对直流侧电压的均衡控制效果还是很明显的,是一种有研究前景的方法。

#### 参考文献:

- [1] 刘钊,刘邦银,段善旭,等. 链式静止同步补偿器的直流电容

电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(30):7-12.

- [2] Woodhouse M L,Donoghue M W,Osborne M M.Type testing of the GTO valves for a novel STATCOM convertor [C] AC-DC Power Transmission 2001. Seventh International Conference on ,London. 2001 .
- [3] 刘文华,宋强,滕乐天,等. 基于链式逆变器的50MVA 静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):145-150.
- [4] 邱燕慧. 串联多电平电能质量控制器直流侧电压控制方法的研究[D]. 西安:西安交通大学,2010.
- [5] 赵瑞斌,邱宇峰,荆平. 一种级联STATCOM 的直流侧电压控制方法[J]. 电力电子,2009(4):18-22.
- [6] 雷霄,肖湘宁,徐永海,等. 并联型级联多电平逆变器直流电容电压控制方法[J]. 电网技术,2010,24(7):30-35.
- [7] 王东. 超级电容器储能系统电压均衡的研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [8] 李海东. 超级电容器模块化技术的研究[D]. 北京:中国科学院电工研究所,2006.

(上接第16页)

#### 参考文献:

- [1] 李圣清,何伟华,罗飞,等. 串联混合型有源电力滤波器对三相负载谐波源补偿特性的研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(34):115-119.
- [2] 武健,何娜,徐殿国. 无变压器型并联混合型有源滤波器设计及应用[J]. 中国电机工程学报,2008,28(12):88-94.
- [3] Singh B,Yerma V,Chanda A et al Hybrid filters for power quality improvement[J]. IEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution 2005,152(3):365-378.
- [4] 周柯,罗安,唐欣,等. 大功率并联混合型有源电力滤波器的综合设计与工程应用[J]. 电工电能新技术,2007,26(1):29-33.
- [5] Fujita H,Yamasaki T,Akagi H A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems[J]. IEEE Trans. Power Electronics 2000,15(2):215-222.
- [6] 李圣清,朱英浩,周有庆,等. 基于交互式多目标遗传算法的

无源滤波器优化设计[J]. 电工技术学报,2003,18(6):1-6.

- [7] 王立国,徐殿国,苗立杰,等. 无源滤波装置的建模分析及参数摄动的影响[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):70-74.
- [8] 陆秀令,周腊吾,张松华,等. 无源滤波器多目标优化设计[J]. 高电压技术,2007,33(12):177-182.
- [9] 陈峻岭,姜新建,朱东起,等. 基于遗传算法混合有源滤波器参数的多目标优化[J]. 清华大学学报:自然科学版,2006,46(1):5-8.
- [10] 赵曙光,王宇平,焦李成,等. 基于自适应遗传算法的无源电力滤波器综合优化方法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):173-176.
- [11] 涂春鸣,罗安,刘娟. 无源滤波器多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报,2002,22(3):17-21.
- [12] 寇攀高,周建中,何耀耀,等. 基于菌群一粒子群算法的水轮发电机组PID调速器参数优化[J]. 中国电机工程学报,2009,29(26):101-106.

(上接第21页)

- [14] Girgis A, Brahma S.M. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system[C]//Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. 2001: 115-119.
- [15] Geidl M. Protection of Power systems with distributed generation: State of the Art Power Systems Laboratory. Swiss Federal Inst. Technol. (ETH) Zurich [EB/OL]. [http://www.e-collection.ethbib.ethz.ch/ecol-pool/bericht/bericht\\_424.pdf](http://www.e-collection.ethbib.ethz.ch/ecol-pool/bericht/bericht_424.pdf).
- [16] Ye L, Lin L Z, Juengst K.P. Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2002, 12(1): 900-903.
- [17] Abapour M, Tarafdar Hagh M. A non-control transformer inrush current limiter [C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. 2006: 2390-2395.
- [18] Tarafdar Hagh M, Abapour M. DC reactor type transformer inrush current limiter [J]. IET Electric Power Application, 2007, 1(5):

808-814.

- [19] Chang C S, Loh P C. Integration of fault current limiters on power systems for voltage quality improvement [J]. Elsevier journal of Electric Power Systems Research, 2001, 57(2): 83-92.
- [20] Ahmed M, Putrus G, Ran L. Power quality improvement using a solid-state fault current limiter. Asia Pacific[C]//IEEE/PES Trans. And Dist. Conf. and Exhibition. 2002: 1059-1064.
- [21] Tsuda M, Mitani Y, Tsuji K, et al. Application of resistor based superconducting fault current limiter to enhancement of power system transient stability [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11(1): 2122-2125.
- [22] Thuries E. Toward the superconducting fault current limiter [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1991(6): 801-808.
- [23] Boutsika T N, Papathanassiou S. Short circuit calculations in networks with distributed generation [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1181-1191.