

第1章

智能电容器的发展

智能电容器是将一次设备和二次设备集成在一起的独立个体,将模块化、集成化、结构化、智能化、网络化技术引入传统的电容器无功补偿装置中,用多个标准的、通用的、独立的装置组合使用来代替传统的具有定制性的电容器无功补偿成套装置。智能电容器由智能模块与电力电容器两大部分组成。近些年智能电容器在低压配电网感性无功负载的无功补偿中得到了广泛应用。本章首先介绍无功补偿技术及智能电容器的基本原理,然后扼要叙述智能电容器的兴起、发展、功能和特点。

1.1 无功补偿技术

当前电力电子技术飞速发展,电力电子器件被广泛应用,但是电能质量问题日益严重,其中无功问题是一种常见的电能质量问题,而用户对电能质量的要求越来越高,对电能质量的改善提出了迫切需求。

1.1.1 无功功率的定义

无功功率和功率因数是电能质量中两个重要的概念。无功功率常用的定义是在正弦电压和正弦电流的情况下定义的,如图 1-1 所示,设正弦电压为 $u = \sqrt{2}U\sin\omega t$,其有效值为 U ,正弦电流为 $i = \sqrt{2}I\sin(\omega t - \varphi)$,其有效值为 I ,电流滞后电压的角度为 φ 。

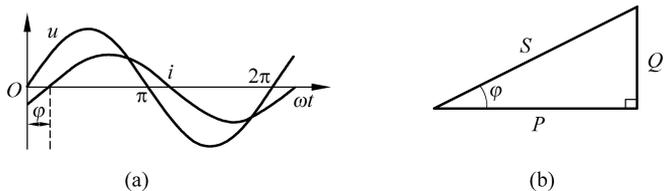


图 1-1 无功功率的定义

(a) 电压和电流波形; (b) 有功功率、无功功率和视在功率的关系

无功功率定义为

$$Q = UI \sin\varphi \quad (1-1)$$

设有功功率为 P ,引入视在功率 S 和功率因数 λ :

$$S = UI \quad (1-2)$$

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (1-3)$$

一般地,在三相对称的正弦电路中,三相无功功率常用单相无功功率乘以3来表示^[1],在测量和计算无功功率的过程中,可以应用单相无功功率来得到三相无功功率。

1.1.2 无功功率的产生和影响

在配电网中,常见的产生无功功率的负载有如下两种:

(1) 感性负载产生无功功率。在工业和生活用电负载中,感性负载所占的比例很大,产生大量无功功率,可称为感性无功功率,例如异步电动机、变压器、日光灯等都是典型的感性负载,产生感性无功功率。

(2) 电力电子装置等非线性装置产生无功功率。例如,由晶闸管构成的相控整流器、相控交流调功器和相控周波变流器等,在工作时导通时刻由晶闸管触发角来控制,基波电流滞后于电网电压,产生无功功率。

无功问题常会影响电网及用电设备的稳定运行,对电网的影响主要有以下三个方面:

(1) 无功功率可导致设备容量增加。用电设备容量主要用视在功率表示,无功功率会使视在功率增加,从而使用电设备容量增大,例如发电机、变压器、导线及其他电气设备由于无功功率的存在使得设备容量增加。

(2) 无功功率可导致设备及线路损耗增加。无功电流在设备和线路中产生损耗,增大了设备和线路的损耗,降低了效率。

(3) 无功功率可导致线路的电压降增大。无功电流在线路阻抗上产生压降,使负载端电压降增大,无功功率的变化还会引起电网电压的波动,甚至导致闪变,使供电质量下降。

1996年颁布并实施的中华人民共和国电力工业部令第八号文件《供电营业规则》要求用户提高用电的自然功率因数。无功功率对供电系统和负荷的正常运行都是十分重要的,网络元件和负荷所需要的无功功率必须从电网获得,为了减小无功功率对电网的影响,常用的方法是在需要消耗无功功率的地方产生无功功率,即无功补偿。

1.1.3 无功功率补偿装置

无功功率补偿是应用一个可以输出无功功率的装置与需要吸收无功功率的负载并联在一起,减少流入电网的无功功率。无功功率补偿原理如图1-2所示。在图1-2(a)中,当负载为感性负载时,需要吸收感性无功功率,无功补偿装置输出感性无功功率(或等效为吸收容性无功功率)给负载;在图1-2(b)中,当负载为容性负载时,需要吸收容性无功功率,无功补偿装置输出容性无功功率(或等效为吸收感性无功功率)给负载。无功功率在无功补偿装置和无功负荷之间相互交换。这样,感性无功负荷所需要的无功功率可由容性无功补偿装置吸收的无功功率进行补偿,从而改善交流电力系统的供电质量,实现提高功率因数、调节电压和平衡各相负载的目的。无功补偿装置的使用,在提高供电系统及负载的功率因数、减少功率损耗、降低设备容量和提高输电能力等方面具有显著作用。

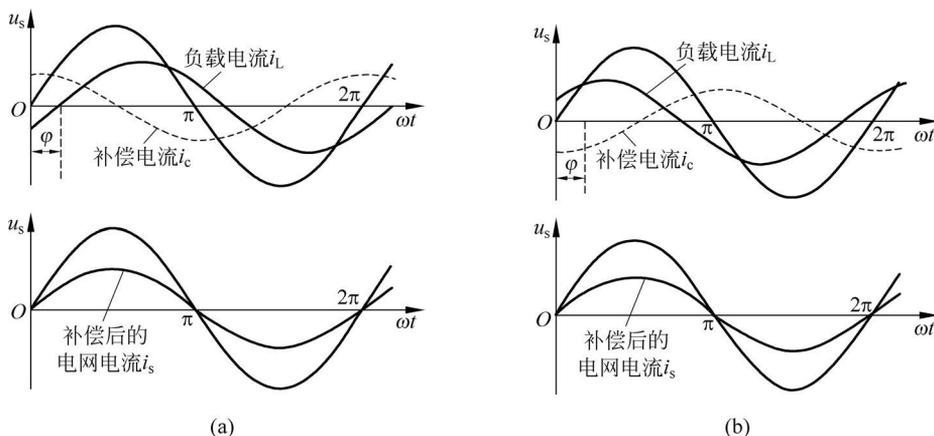


图 1-2 无功功率补偿原理
(a) 感性负载; (b) 容性负载

常用无功补偿装置如图 1-3 所示。

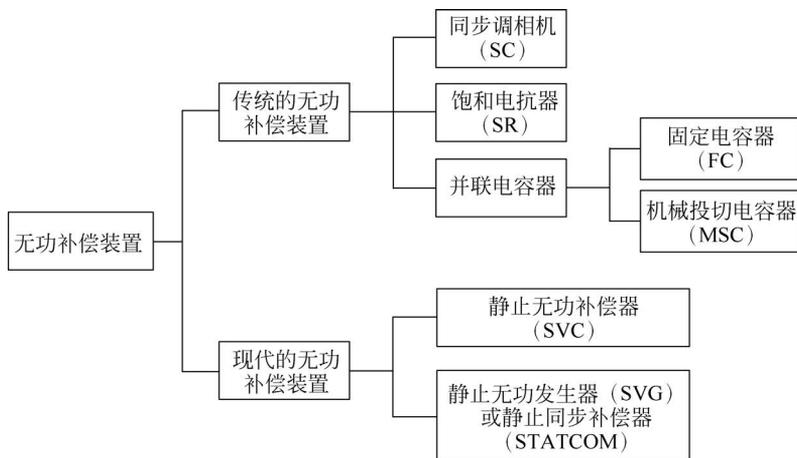


图 1-3 常用的无功补偿装置

无功补偿装置分为传统的无功补偿装置和现代无功补偿装置。传统的无功补偿装置主要有同步调相机 (synchronous condenser, SC)、饱和电抗器 (saturated reactor, SR) 和并联电容器, 其中并联电容器又包含固定电容器 (fixed capacitor, FC)、机械投切电容器 (mechanically switched capacitor, MSC) 两种。现代无功补偿装置以电力电子技术为基础, 主要包含静止无功补偿器 (static var compensator, SVC)、静止无功发生器 (static var generator, SVG) 或静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 等, 其中静止无功补偿器是由晶闸管控制电抗器 (thyristor controlled reactor, TCR) 和晶闸管投切电容器 (thyristor switched capacitor, TSC) 组合而成。现代无功补偿装置在响应速度、维护便利性、连续可控性等方面优于传统的无功补偿装置, 逐渐取代传统的无功补偿装置。各种传统的无功补偿装置和现代无功补偿装置的特点对比如表 1-1 所示^[1]。

表 1-1 各种无功补偿装置的简要对比

项 目	同步调相机 (SC)	饱和电抗器 (SR)	晶闸管控制 电抗器 (TCR)	晶闸管投切 电容器 (TSC)	静止无功 补偿器 (SVC)	静止无功 发生器 (SVG)
响应速度	慢	较快	较快	较快	较快	快
吸收无功	连续	连续	连续	分级	连续	连续
控制	简单	不可控	较简单	较简单	较简单	复杂
谐波电流	无	大	大	无	大	小
分相调节	有限	不可以	可以	有限	可以	可以
损耗	大	较大	中	小	小	小
噪声	大	大	小	小	小	小

1.2 智能电容器的兴起和发展

1.2.1 低压电容器无功补偿技术的发展

并联电容器是现在广泛应用的无功补偿装置。用于低压无功功率补偿的电容器装置在整个发展过程中经历了从简单控制到复杂控制,从手动投切到自动投切,从静态补偿到动态补偿的发展过程,逐渐智能化。

传统无功补偿用的并联电容器是固定电容器(FC)。虽然固定电容器具有简单经济和灵活简便的特点,但其阻抗是固定的,不能跟踪无功补偿需求的变化,也就是不能实现对无功功率的动态补偿。随着电力系统和负载的发展,对快速、动态补偿无功功率的需求越来越大。

当需要对无功功率进行动态补偿时,一般采用电容器分组投入或切除的方式进行阶跃式调节,例如应用机械投切电容器(MSC)进行分组投切,称其为动态无功补偿,这里的“动态”一词主要是针对固定电容器中的“固定”而言。在机械投切电容器中,应用例如真空接触器等机械式开关进行电容器的投切,在投切过程中由于不能控制投切时刻,所以不能实现过零投切,会产生过电压和瞬间涌流,当负荷变化或无功补偿变化比较频繁时,其投切开关频繁动作会大大降低其使用寿命。

随着电力电子技术的发展,电力电子器件被应用在无功补偿装置中,使用晶闸管的静止无功补偿装置占据了无功补偿装置的主导地位。这里的“静止”一词主要是针对旋转的同步调相机而言的。TSC应用反并联的两只晶闸管构成的无触点开关来投切电容器,极大地改进了投切开关的性能并延长了其使用寿命,但仍然无法实现对无功功率的连续补偿。按照应用范围,可将TSC分为日常民用TSC和工业用TSC两类。民用TSC主要安装于城市低压配电网和居民电力用户端的装置中,用于补偿无功功率,补偿后用电端的功率因数可达到0.95以上,且不会出现因过补偿而使得无功功率倒送的现象。工业用TSC在工业系统中应用广泛,用于补偿工业生产中因大功率、冲击性及非线性负载引起的无功功率,例如在冶金、采矿、电气化铁路等领域中得到了广泛应用。

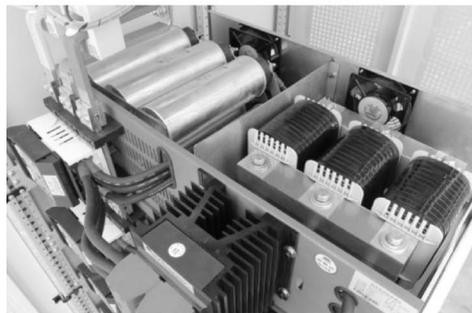
随着电力电子技术的进一步发展,全控型器件出现,一种更为先进的静止型无功补偿装置——静止无功发生器(SVG)或静止同步补偿器(STATCOM)产生了,其应用全控型桥式变流电路对无功电流进行控制,进而控制无功功率,对桥式变流电路进行不同的控制,可

使得 SVG 或 STATCOM 发出无功功率或吸收无功功率,对外既可以呈容性来补偿感性负载的无功功率,也可以呈感性来补偿容性负载的无功功率。SVG 和 SVC 不同,SVC 主要应用半控型电力电子器件晶闸管,且需要大容量的电容器或电抗器,而 SVG 主要应用全控型电力电子器件,桥式变流电路的直流侧只需要较小容量的电容器或电抗器来维持其电压或者电流即可^[1]。

无功补偿装置的发展历程也是对装置的无功补偿性能不断改进的过程。各种无功补偿装置的优缺点决定了其应用的场合和应用的范围。虽然 SVG 或 STATCOM 具有响应速度快、谐波电流小以及可以连续调节等优异性能,但因其具有成本较高、控制系统复杂等特点,使得 SVG 或 STATCOM 的应用受到限制。而静止无功补偿器(SVC)虽然具有可能存在过电压或瞬间涌流、系统参数和特性容易漂移、易与系统阻抗产生谐振、存在投切振荡、易频繁误投切、投切速度慢等缺点,但是其具有成本低、控制系统简单等优势,在实际中仍得到了广泛的应用。

目前在无功补偿装置的应用中,SVC 占绝大部分份额,SVC 的主要生产企业有荣信电力电子股份有限公司、思源清能电气电子有限公司、中电普瑞科技有限公司、西安西电科技实业有限责任公司、ABB、Siemens 等。

随着我国智能电网建设进入新的发展阶段,电力设备进一步更新换代,智能用电设备发展迅速。在此背景下,低压电容器无功补偿装置在传统电容器无功补偿模式和装置的基础上,不断向智能化方向发展。在向智能化发展的过程中,首先经历了模块化发展阶段,产生了模块化的低压电容器无功补偿装置。模块化低压电容器无功补偿装置是将传统的无功补偿装置中的主要一次元器件例如电容器、电抗器、投切开关和部分二次接线集成在一个低压柜单元中,作为低压电容器无功补偿柜的一个抽屉单元或模块单元来使用,如图 1-4 所示。与传统的无功补偿装置相比,模块化低压电容器无功补偿装置的集成度更高,多个抽屉单元或模块单元组合应用可方便扩容,使得成套设备生产厂家在组装和维护时更为方便。但是这种模块化的补偿器单元中没有智能控制功能,仅仅是对传统的低压电容器无功补偿装置的并联和集成,不带有整体装置的控制、保护等智能功能。



(a)



(b)

图 1-4 模块化无功补偿装置

(a) 单个模块结构; (b) 多模块抽屉式结构

低压电容器无功补偿装置在向智能化发展的过程中还经历了集成化的发展阶段,将低压电容器无功补偿装置集成化,使其具备控制、保护、测量等各种智能的功能。早在 2002 年,有些厂家开始尝试集成化和智能化,应用传统的接触器或复合开关作为投切开关,具有一定的控制、保护等功能。随着智能电气产品的发展,磁保持继电器的机械和电气特性得到了长足的发展,可以适用于小容量低压电力电容器的同步开关(复合开关的一种)中,可以达到百万次以上的带负荷投切。2006 年以后,磁保持继电器构成的同步开关作为投切开关在低压电容器无功补偿装置中被广泛应用。

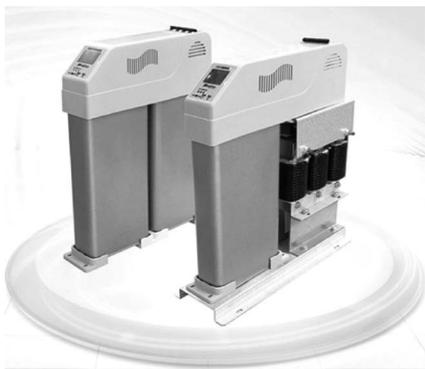


图 1-5 智能电容器

近些年,随着微电子技术、数字控制技术、通信与网络技术的高速发展和广泛应用,智能电器技术迅速发展,低压电容器无功补偿装置朝着智能化、模块化、集成化、网络化的方向发展,具有高可靠性、可用性、可维护性、安全、节能、环保等特征。在此背景下,产生了智能电容器,其采用了新型的投切开关控制技术,集成了电容器、电抗器、同步投切开关、控制器、微型断路器等一次器件和二次器件,具有控制、保护、过零投切、级联通信等功能,如图 1-5 所示。相对于传统的低压无功补偿装置和模块化无功补偿装置,智能电容器具有独立的单柜结构,其体积小,

接线简单,易于多台组合扩容,积木式搭接结构使得低压无功补偿柜的安装和维护更为方便。越来越多的厂商开始研发和生产此类电容器无功补偿装置。

1.2.2 低压电容器无功补偿技术的分类

根据国家相关标准,电容器无功补偿设备分为高压并联电容器装置和低压并联电容器装置。高压并联电容器装置由电容器和相应的电气一次及二次配套设备组成,并联接于标称电压 1kV 以上的三相交流电力系统中,能完成独立投运。低压并联电容器装置由低压电容器和相应的电气一次及二次配套元件组成,并联接于标称电压 1kV 以下的三相交流配电网中,能完成独立投运^[2-5]。

低压电容器无功补偿装置的分类如表 1-2 所示。

表 1-2 低压电容器无功补偿装置的分类

分类方式	类 型			
	安装地点	户内型		户外型
安装部位	集中补偿		分组补偿	末端补偿
补偿方式	三相对称补偿型	分相补偿型	相间不对称补偿型	混合补偿型
投切电容器的开关类型	机械开关	电子开关	复合开关	同步开关 (复合开关的一种)
有无抑制谐波或滤波功能	无抑制谐波或滤波功能		有抑制谐波功能	有滤波功能
切除到投入的最小时间间隔	快速型		普通型	
控制方式	手动控制		自动控制	

按照安装部位分类,可分为集中补偿、分组补偿和末端补偿三类。集中补偿装置是指将低压电容器无功补偿成套装置安装在变电所,对变电所无功功率进行集中补偿;分组补偿装置是指将低压电容器无功补偿成套装置安装在功率因数较低的用电单元或母线上,对供配电系统中的一部分(区域)无功功率进行分段(区域)补偿;末端补偿装置是指将低压电容器无功补偿成套装置直接安装在感性用电负载附近,对负载无功功率进行就地补偿。

按照补偿方式分类,可分为三相对称补偿型、分相补偿型、相间不对称补偿型和混合补偿型四类^[2]。三相对称补偿型装置内三相一起投入或者切除电容器,三相电容器既可连接成三角形也可以连接成星形,允许其中一相不经电容器投切开关而接入主电路;分相补偿型装置内每相分别由电容器投切器件将这一相电容器投入或切除,三个单相电容器连接成星形,三个电容器应将中性线与主电路中性线相连,正常运行时可控制每相电容器投切开关的接通或断开;相间不对称补偿型装置内三个电容器分别串联电容器投切开关后接成三角形并连接到三相主电路中,投入或切除主电路相间的电容器;混合补偿型装置内同时装有三相对称补偿型装置、分相补偿型装置、相间不对称补偿型装置中的两种或以上。

按照投切电容器的开关类型分类,可分为机械开关、电子开关、复合开关和同步开关(复合开关的一种),例如应用接触器的机械开关、应用晶闸管的半导体电子开关、半导体电子开关和机电开关并联组合使用的复合开关、可控制过零投切的同步开关等,在后面的章节中将做详细介绍。

按照有无抑制谐波或滤波功能分类,可分为无抑制谐波或滤波功能、有抑制谐波功能和有滤波功能三类。其中有抑制谐波功能的装置投入运行时不能使系统谐波含量增加或产生谐振;有滤波功能的装置投入运行时会对系统滤波,使其谐波含量减少。

按切除到投入的最小时间间隔分类,可分为快速型和普通型。快速型装置补偿响应时间不大于 100ms,普通型装置补偿响应时间大于 100ms^[2]。

按控制方式分类,可分为手动控制和自动控制。手动控制装置由操作人员手动控制电容器投入和切除,自动控制装置通过控制器进行电容器组自动投入和切除,也可通过该控制器进行手动控制。

1.2.3 智能电容器的定义

智能电容器是包含一次设备和二次设备的独立个体。它包含以低压电力电容器为主体的一次设备和以智能测控处理器为控制核心的二次设备,是通过具有过零投切功能的开关来投切电容器的模块化低压无功补偿装置。智能电容器集成了现代测控技术、网络通信技术、自动控制技术、电力电子技术等先进技术,其在模块化、集成化的基础上实现了智能化的无功补偿功能。智能电容器由智能控制模块和电力电容器模块两大部分组成,包括智能测量系统、过零投切系统、保护系统、通信系统、人机对话系统、电力电容器等模块。模块化的单独个体组合起来使用替代原来的成套无功补偿装置。每一台智能电容器都是一个独立的无功补偿装置,多台智能电容器也可以通过通信系统构成智能电容器组来进行无功补偿。

目前,我国没有关于智能电容器的相关标准,也没有权威的第三方或者业内主流厂商对智能电容器进行明确定义,在工程应用中智能电容器的标准及产品的 CCC 认证(中国强制性产品认证)按《低压成套无功功率补偿装置》(GB/T 15576—2020)执行,但是此标准针

对的对象与智能电容器的相关性较差。目前市场上已有多种类型和规格型号的智能电容器,各个厂商生产的智能电容器在结构、控制、通信功能等方面均有不同。但是,它们有以下共同特征:每台智能电容器均包含智能监控模块和低压电力电容器;智能监控模块除具有传统无功补偿控制器的无功控制功能外,还有测量、保护、通信、级联、监控等功能;智能电容器内包含独立的控制器,无须外接控制器;单台智能电容器体积小,接线简单;多台智能电容器以积木式搭接结构组成智能电容器组,易于扩充补偿容量。具有上述特征的电容器,可以称之为智能电容器。

1.2.4 智能电容器的基本原理

智能电容器同其他低压并联电容器一样,通常并联在低压电力母线上,用于补偿低压配电系统的无功功率,提高功率因数,从而降低电能损耗,提高配电网的运行效率和电能质量,保证其他设备的正常运行。

智能电容器无功补偿的基本原理如图 1-6 所示。其中,图 1-6(a)为等效电路图,投切开关起到将电容器接入电网或从电网断开的作用,而串联的电抗器主要用来抑制谐波电流流入电容器,同时也能抑制电容器投入电网时的冲击电流,使电流变化率保持在开关器件可以承受的范围之内,适当设计串联的电抗器的值,其还可以作为滤波器来抑制高次谐波。当智能电容器投入时,电容器的电压与电流的关系如图 1-6(b)所示,其中 \dot{U} 表示电网电压, \dot{I}_L 表示负载电流(分为有功电流 \dot{I}_P 和无功电流 \dot{I}_Q), \dot{I}_C 表示补偿的无功电流(由于智能电容器中串联电抗器的容量相对较小,因此智能电容器的工作电流一般超前于电网电压 90°), \dot{I}_S 表示补偿后的电网电流。无功电流补偿后,负载电流滞后于电压的角度由 φ_1 变为 φ_2 。

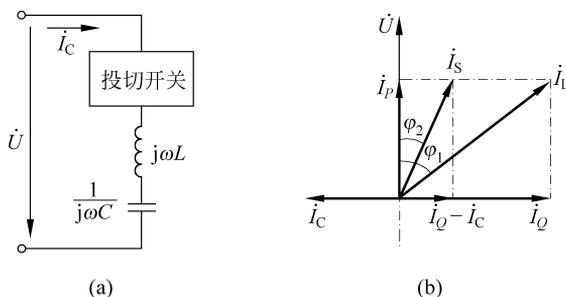


图 1-6 智能电容器无功补偿的基本原理

(a) 等效电路图; (b) 电压和电流相量图

智能电容器结构图如图 1-7 所示,一次设备包含总电源接入端、快速断路器、过零投切开关和低压自愈式干式电容器;二次设备包含人机界面、智能控制单元、电压和电流检测单元。智能电容器工作时,采集三相低压母线上的电压和需要补偿的负荷电流,通过接线端子输入智能控制单元。智能控制单元的中央处理器根据采集的各种数据进行快速计算,得出精确的电容器投切容量及投切组合规则,并输出控制信号来控制投切开关实现过零投切,最终实现低压无功补偿的功能。同时,通过 RS-485 等通信接口,可将多台智能电容器连接成一个具有主从自适应控制功能的无功补偿系统,无须外接控制器。另外,通过液晶

显示屏或触控显示装置实现人机界面,可以更为有效和方便地实现参数设定、运行状态显示与故障排查等人机交互的功能。图 1-8 给出了智能电容器在配电网中的接线示意图。

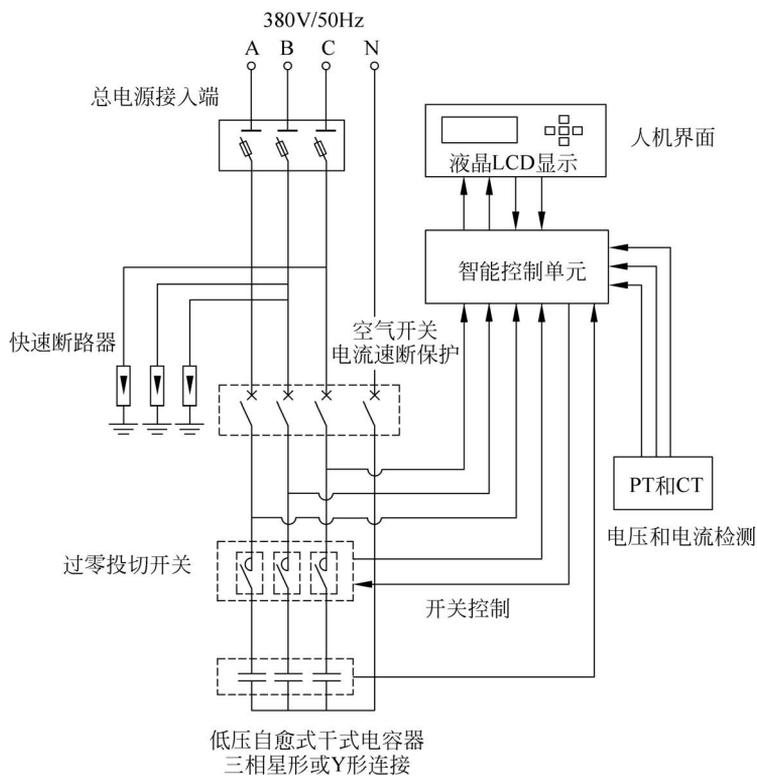


图 1-7 智能电容器结构图

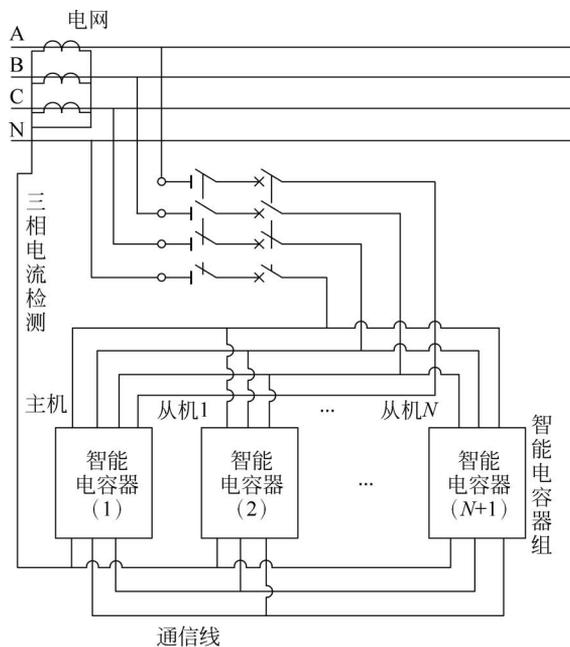


图 1-8 智能电容器在配电网中的接线示意图

1.2.5 智能电容器的发展现状

随着我国电力工业的快速发展以及技术水平的不断提高,我国不断深入推进节能减排政策,建设智能电网的需求在增长,无功补偿及相对应的节能控制产品的市场规模将迅速扩大。

智能电容器是在模块化低压电容器无功补偿装置的基础上,结合用户对智能电气设备的要求,将原电容器无功补偿控制器的功能创造性地集成到电容器模块中,并采用可靠、精确、智能化的过零投切开关技术,使得电容器无功补偿装置的体积和接线大为减少。智能电容器首先在建筑行业的配电网无功补偿领域得到应用。智能电容器的雏形最早出现在2002年前后,一些无功补偿设备生产厂家开始开发智能化的低压电容器无功补偿装置,该装置与模块化低压无功补偿装置类似,当时称之为智能集成电力电容器补偿装置。随着技术人员将磁保持继电器应用于电容器的投切控制中,限制智能电容器发展的投切开关的损耗和寿命问题得以解决,因此从2006年开始,国内智能电容器的发展进入了一个新的阶段,一些无功补偿设备生产厂家开发出了新一代智能电容器产品,在智能电容器产品中加入了过零投切、控制保护、级联通信等功能,在低压电容器无功补偿领域中大量推广和应用,智能电容器得到了市场和用户的认可,并逐渐开始取代传统的低压电容器无功补偿装置。随着智能电容器的进一步普及和推广以及在配电网中的广泛应用,国内生产低压电容器的厂商逐渐意识到智能电容器可能取代大部分的传统低压电容器无功补偿产品,成为一种新型的低压电容器无功补偿装置,因此国内低压电容器厂商从2006年起就逐渐开始研发不同类型的智能电容器,并积极投入市场。目前,国内生产智能电容器的厂商越来越多,具有CCC认证智能电容器产品的厂商已经超过100家,并在逐年增加,国内知名的智能电容器生产厂家越来越多,具有代表性的厂家有江苏现代电力科技股份有限公司、南通富士特电力自动化有限公司、浙江亿德科技有限公司、厦门明翰电气股份有限公司、恒一电气有限公司、浙江沃尔德电力电子有限公司、台州安耐杰电力设备有限公司、成都星宇节能技术股份有限公司、淄博莱宝电力电容器有限公司等。国外生产低压电容器无功补偿产品的厂商也有很多,例如ABB、DUCATI、ELSPEC、Schneider、NOKIAN等。

1.2.6 智能电容器在配电网中的需求及面临的挑战

随着电力用户对电能质量的要求越来越高,供配电企业对降低用户电能损耗的要求越来越严格,低压电容器无功补偿装置作为最基础、最基本的节能降耗产品,日益引起电力用户的广泛关注。同时,就地提高功率因数已经体现出了很好的发展优势,而智能电容器作为新一代的低压电容器无功补偿和功率因数提升产品,在装置智能化、模块化、小型化、易维护方面有着一定的优势。

在低压配电网中,无功补偿装置已经成为和变压器一样不可或缺的电力设备,有着节能降耗的功能。在低压配电网中,无功补偿装置的配置容量一般为变压器容量的20%~40%^[4],因此,在新建低压配电项目中,无功补偿装置有着极大的市场容量和份额。同时,随着国家电力设备朝着智能化的方向发展,智能电容器可以取代已有配电网中传统的电容器无功补偿装置,其结构特点易于对原有电容器无功补偿装置进行改造,因此,市场对智能