

抑制电压波动的配电系统用静止型无功功率补偿装置

邓隐北，黄仁珠，黄亮亮，杨松 编译

江西森阳科技股份有限公司

摘要：本文阐述了配电系统用静止型无功功率补偿装置的结构与特点。近年来，光伏发电的引入正在急速扩大，伴随着引入的扩大，有可能产生配电线路的电压上升及电压波动等问题。为了解决配电系统的电压问题，富士电机公司开发了由无功功率控制电压的静止型无功功率补偿装置（SVC）。他励式配电系统用SVC，因不需要高次谐波的滤波器，故装置的结构简单。由东北电力股份有限公司的现场试验，已确认抑制电压升高的效果。自励式配电系统用SVC，利用了SiC器件产生的低损耗特性，能安装在单根电杆上实现自然的空气冷却，故为一小型、轻量的补偿装置。

关键词：静止型无功功率补偿装置（SVC），他励式SVC，自励式SVC，配电系统，电压调整

1 前言

目前，由于可再生资源固定价格收购制度、新能源补贴政策（FIT）等，光伏发电向系统引入正快速增长。另一方面，光伏发电受天气气候影响导致输出的变化，是不稳定的电源，随着引入的扩大会出现配电线路电压上升等问题。原来的电压控制方法是借助配电线的自动电压调节器（SVR）等，在适当的电压范围内能得到圆满解决。SVR 因电压控制的分级（step）切换及时间上的滞后，抑制不规则且急剧的电压波动是有困难的。

富士电机公司为使配电系统的电压稳定，提供了用无功功率控制电压的配电系统用静止型无功功率补偿装置（SVC）。本文，阐述了有关该配电系统用 SVC 的结构与特点。

2 配电系统用 SVC 的特点

2.1 SVR 与 SVC 的差异

图 1 所示为 SVR 与 SVC 中的调整概念图。作为原来电压控制中主要技术的 SVR，因为用变压器的分接头（tap）进行切换，是调节电压的串联设备。一旦切换分接头，从 SVR 设置地点前面的电压，均按同一规律变化。由 SVR 的电压控制方法，是计测在 SVR 设置点的电压及通过电流，并按目标电压来操作分接头。分接头的操作采取如图 1 所

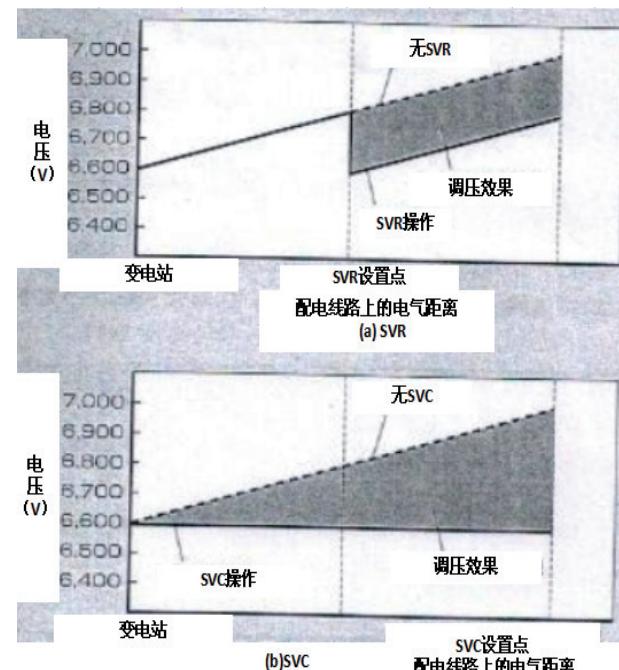


图 1 电压调整的概念图

示的电压调控，调整幅度为 100V。

另一方面，SVC 则是将无功功率注入系统，是调整电压的并联设备。SVC 设置点与变电站之间的电感（inductance）为 X，X 与无功功率 Q 的关系，可有下面的近似式计算：

$$\Delta V = \frac{XQ}{V}$$

式中： ΔV 为电压调整的幅度（V）；X 为从变电站到 SVC 设置点的电感（Ω）；Q 为无功功率（Var）；V 为系统的电压。

通过 SVC 对电压的控制，在 SVC 设置点计测电压，相当于这一计测电压与目标电压的差值，输出必要的无功功率。另外，SVC 因能连续的输出无功功率，故能连续的形成图 1 所示的电压调整幅度。

SVC，从变电站开始的电感值大的地点，也即设置于从变电站离开地点，但更靠近变电站地点的电压也能调整。因此，由光伏发电等从变电站离开地点产生的电压上升等问题时，用 SVC 进行调压是有利的。而且，由光伏发电等导致的急剧电压变动，如用 SVR 作为对策相应解决的话，则不想因 SVR 机械的分接头操作次数增多，按不同场合还担心 SVR 的切换时间会提前。另一方面，如用 SVC 来操作，即使控制急剧的电压波动也不会产生机械的操作，不会缩短切换的周期。

考虑到 SVR 与 SVC 的特点，SVR 设置在变电站旁，SVC 则设置在配电线路上的末端，分别具有各自的特点。图 2 表示 SVR 设置 2 台时和 SVR 与 SVC 均设置 1 台时，二者电压调整的概念图。

图 2 (a) 中为 2 台 SVR 进行电压调整，但在线路末端产生电压上升。另一方面图 2 (b)，是由 SVR 与 SVC 可对整个系统产生的电压上升进行控制，尤其是在末端的电压上升由 SVC 控制，变电站侧的电压上升可由 SVR 抑制。这样通过已有 SVR 与 SVC，一方面相互协调，另一方面，保持整个系统的电压良好稳定。

此外，SVC 有 2 种，一为对流过电抗器 (reactor) 等的电流进行控制，使产生无功功率的他励式 SVC；另一为利用本身消弧型的开关元件，通过任一相位产生的电流

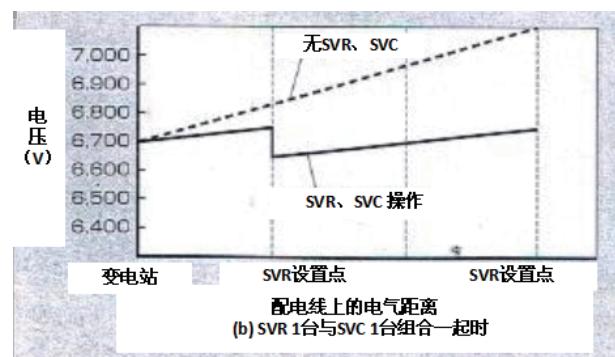
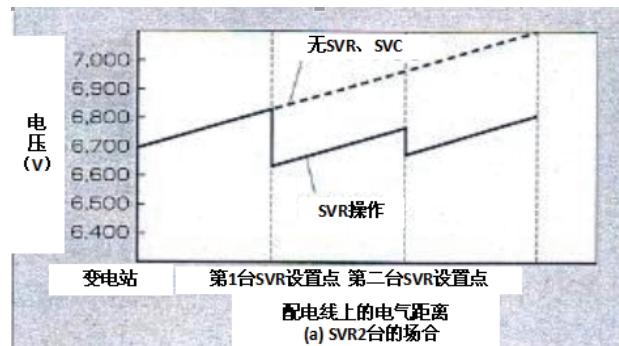


图 2 多台电压调整的概念图

或电压、使发生无功功率的自励式 SVC。有关富士电机公司开发的他励式与自励式配电系统用 SVC 介绍如下。

2.2 他励式配电系统用 SVC 的结构

他励式配电系统用 SVC 一般是用半导体开关元件 (thyristor) 直接接通与关断流过电抗器的电流，以此进行控制的 TCR (Thyristor Controller Reactor) 方式。该方式下，因为由半导体开关元件对电抗器的电流直接切换，必须要有高次谐波的滤波器。与此对应，富士电机与东北电力公司进行共同研究，利用了通过磁通控制技术的可变电感器 (inductor) 的新型他励式配电系统用 SVC 已经开发。在这一方式中，通过电抗器的电流可由直流电流进行控制，由此，能取消高次谐波的滤波器，对比原来的装置，可实现结构简单的 SVC。

新型他励式配电系统用 SVC 的基本原理如图 3 所示。这与原来的他励式配电系统用 SVC 原理上是不同的。

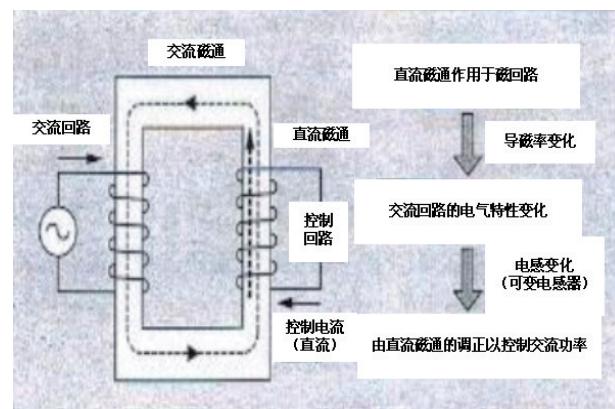


图 3 他励式配电系统用 SVC 的基本原理

将交流线圈与控制线圈实际安装在磁芯上，在控制线圈中流过直流电流并产生磁饱和，因而削减了实际有效的

磁导率。根据这一原理，控制磁通密度，改变磁导率，由此，可控制实际的电感，故能调节流入系统的无功功率。主回路仅由铁芯和线圈构成，相对于浪涌（surge）等的耐受程度高。能实现容易确保可靠性的结构。而且，因调整无功功率输出的控制电流为直流，控制回路及软件的算法（algorithm）也能简化。

已开发的他励式配电系统用 SVC 的外观如图 4，规格列于表 1。

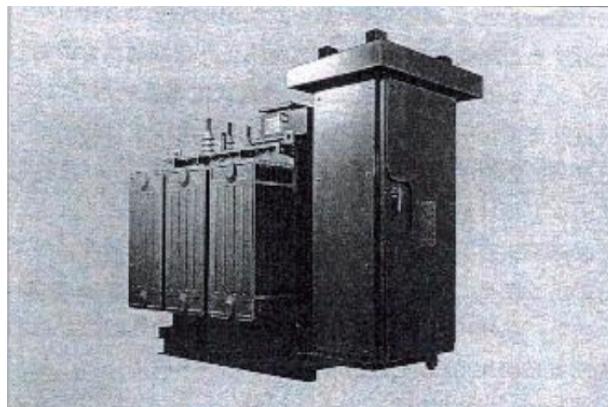


图 4 他励式配电系统用 SVC

表 1：他励式配电系统用 SVC 的规格

项目	规格
额定容量	300KVA
可变容量	0-300KVar (超前 滞后)
额定电压	6600V
频率	50/60HZ
冷却方式	自然空冷
重量	4000Kg 以下 (60HZ)
外形尺寸	W2500*D1500*H2000/mm 以内
主回路	可变电感器 (无高次谐波滤波器)

2.3 自励式配电系统用 SVC 的结构

自励式配电系统用 SVC，采用自己消弧型的开关元件调整无功功率，是调节电压的装置。原来的自励式配电系统用 SVC，采用了 Si（硅）半导体材料，难于高耐压与高频的开关操作，损耗与噪音的降低有限制。因此，需要原来的冷却风扇，导致维护性有难度，安装到电柱上也需要 2 根支柱。

富士电机公司作为这一对策，旨在实现不需冷却风扇的自励式配电系统用 SVC，应用 SiC（碳化硅）取代了 Si（硅）元素的功率半导体元件，对此 SVC 正进行着开发。SiC 比 Si，是可能高耐压与高频开关操作的半导体材料。目前，已开发并应用 3.3KV 200A 的 SiC 功率半导体。已

开发的自励式配电系统用 SVC 的电路示于图 5，规格列于表 2。

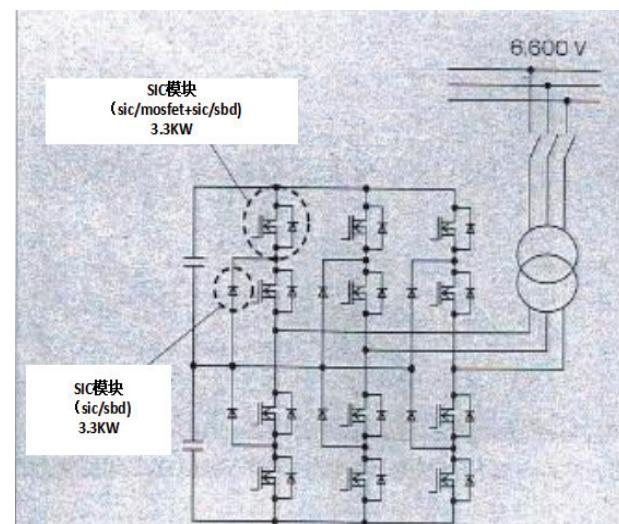


图 5 自励式配电系统用 SVC 的电路

表 2：自励式配电系统用 SVC 的规格

项目	规格
额定容量	300KVA
可变容量	0-300KVar (超前 滞后)
额定电压	6600V
频率	50/60HZ
冷却方式	自然空冷
重量	1800Kg 以下 (60HZ)
外形尺寸	W1300*D1000*H2500
主回路	变压器、变频器

采用由 3.3KV SiC-MOSFET（金属氧化物半导体场效应晶体管）与 SiC-SBD（肖特基势垒二极管）组成 SiC 模块的 3 电平变频器，与联网的变压器一起构成了自励式配电系统用 SVC，通过进行的热分析，预计本结构能实现无需风扇的自然空气冷却。

应用 SiC 元件的自励式配电系统用 SVC，对比他励式配电系统用 SVC，应达到轻量化，体积和重量也能在单柱式电杆上安装。

2017 年在电力中心研究所的试验中心进行了验证试验，预定 2018 年度在电力公司的现场再进行验证。

此外，这一自励式配电系统用 SVC 的成果，已通过了国家新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的“分散型能源下世代电力网构筑验证事业”的认证。

3 配电系统中 SVC 的操作

为确认由新型他励式配电系统用 SVC 对调压的操作效果，得到了东北电力股份有限公司的协助，在其管辖区内的实际配电线路上进行了现场试验。现场试验的系统图示于图 6。图 7 为设置的状况。

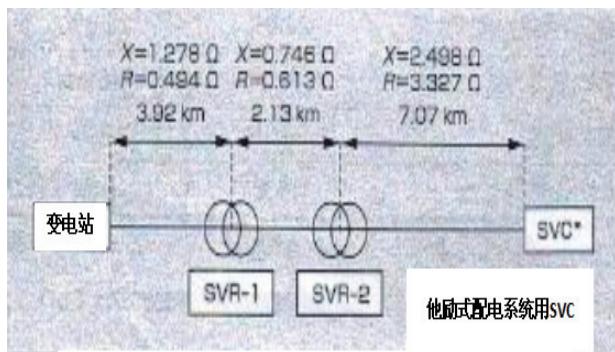


图 6 现场实验系统图

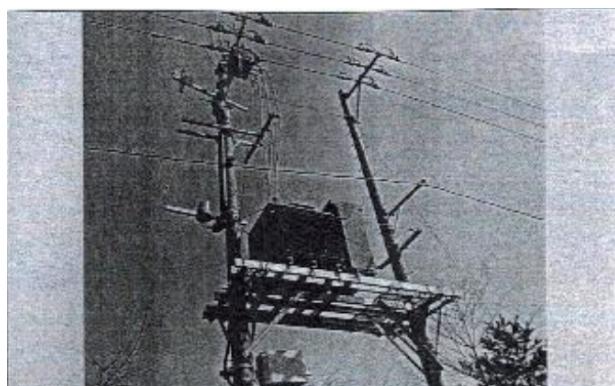


图 7 现场试验中他励式配电系统用 SVC 的设置情况

现场试验的结果示于图 8 与表 3。图 8 所示为设置他励式配电系统用 SVC 的前后相隔 1 天时间电压变化的例子。在此情况下，作为他励式配电系统用 SVC 的控制，是采用如超过上限电压 (6700V) 即输出无功功率以抑制电压上升的控制方式。对所选择的系统，如在设置他励式配电系统用 SVC 之前会出现超过 6800V 的电压等，则属于平均电压高的系统。在设置后，最大电压与平均电压均降低，能确认电压上升可予以抑制，而且，也能确认，急剧的电压变动的抑制效果。

此外，系统内的 SVR-2 一天的操作次数，与设置他励式配电系统用 SVC 之前比较，能确认设置后次数减少。一般说，SVC 与 SVR 设置在同一系统的场合下，相互控制会产生干扰，SVR 操作次数多引起的摆动现象

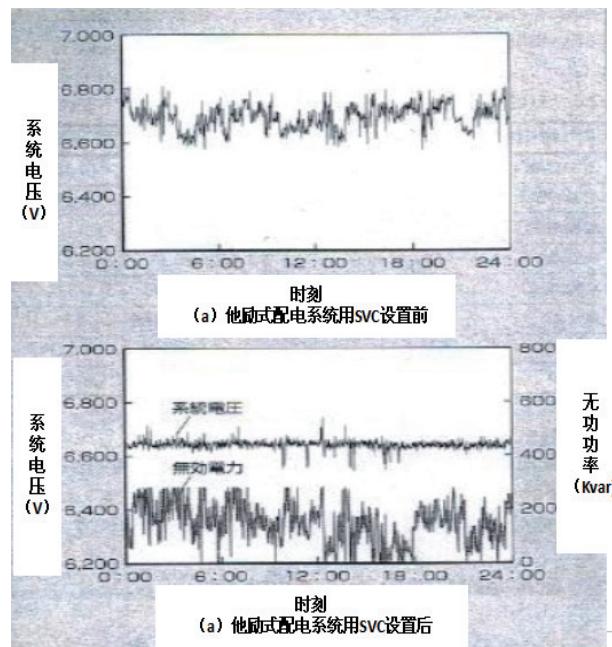


图 8 现场实验结果之一例

表 3：现场试验结果

项目	试验结果	
	设置前	设置后
平均电压	6680V	6639V
最大电压	6835V	6740V
最小电压	6512V	6543V
电压管理范围 内的频度*1	72.90%	99.90%
平均无功功率值	-	146KVar
最大电压变化*2	210V	120V
SVR-2 的操作次数	15次	5次

*1 假定管理范围为从 6350V 到 6720V，以 1 日作为 100% 时，电压处于此范围内的比例；

*2 现在的电压数据与 1 分钟前的电压数据之差的最大绝对值。

(hunting)，以及仅 SVC 控制引起的偏置，会导致 SVR 不操作这一问题。但是，考虑到 SVR 的设置位置和整定值，适当的进行 SVC 的控制和整定，由此能抑制摆动现象等问题。在这次现场实验中，SVR 操作次数多等问题未曾出现，效果良好。SVR 与他励式配电系统用 SVC 能相互协调并控制，这点已被确认。光伏发电的引入增加及其功率的变动成为问题，但对起因于此的 SVR 操作次数增多的抑制效果也是显而易见的。

下转160页