有助于解决电压变动问题的配电系统用静止型无功功率补偿装置

Distribution Static Var Compensators and Static Synchronous Compensators for Suppressing Voltage Fluctuation

小岛　武彦 KOJIMA, Takehiko　　矶谷　仁志 ISOTANI, Hitoshi　　山田　真 YAMADA, Makoto

近年来，太阳能发电的导入在急速扩大。在这种趋势下，可能会引发配电线电压上升等问题。作为解决配电系统电压问题的对策，富士电机开发出了利用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 不需要高次谐波滤波器，因此装置构成十分简单，通过东北电力株式会社管辖区域内的现场试验，确认到了可抑制电压上升的效果。自励式配电系统用 SVC 是一种小型、轻量的装置，它使用了 SiC 元件，还因采用了能发挥其低功耗特性的自然风冷，所以可以安装在一根柱子上。

The rapidly expanding introduction of photovoltaic power systems in recent years may cause problems such as a voltage rise in distribution lines. To solve the voltage problems in distribution systems, Fuji Electric has developed static var compensators (SVCs) and static synchronous compensators (STATCOMs), which control voltage with reactive power. Fuji Electric's SVCs offer a simple equipment configuration without the need for a harmonic filter. We confirmed the effect of suppressing a voltage rise by conducting a field test within the territory of Tohoku Electric Power Co., Inc. The distribution STATCOMs are compact and lightweight devices that use SiC devices to achieve single-pole tower mounting with natural air cooling by taking advantage of these low power dissipation characteristics.

1　引言

近年来，随着“可再生能源定价收购制度”（FIT）等的颁布，太阳能发电的导入急速扩大。另一方面，太阳能发电是一种会受天气影响而出现输出变动的不稳定电源，随着导入的扩大，会出现配电线电压上升等问题。传统的电压控制方法，是利用配电线自动电压调整器（SVR：Step Voltage Regulator）等将其控制在合理的电压范围内。SVR 会因抽头切换而导致阶段性电压控制和时间延迟，因此难以对应不规则且剧烈的电压变动。

为了稳定配电系统的电压，富士电机推出了利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：Static Var Compensator）产品。本文将对配电系统用 SVC 的构成和特点进行介绍。

2　配电系统用 SVC 的特点

2.1　SVR 与 SVC 的差异

图 1 为 SVR 和 SVC 的电压调整概念图。

传统的电压控制中心（SVR）是一种通过切换变压器的抽头调整电压的串联装置。如果切换抽头，SVR 设置地点之后的电压就会一起发生变动。利用 SVR 的电压控制方法是一种测量 SVR 设置点中的电压和允通电流后，运行抽头以达到目标电压的方法。由于是抽头动作，因此如**图 1**（a）所示，电压调整以 100 V 为一级等，呈阶段性的调整。

另一方面，SVC 则是通过将无功功率注入系统中来调整电压的并联装置。SVC 设置点和变电站之间电感 X 和无功功率 Q 的关系可以利用以下公式计算出近似值。

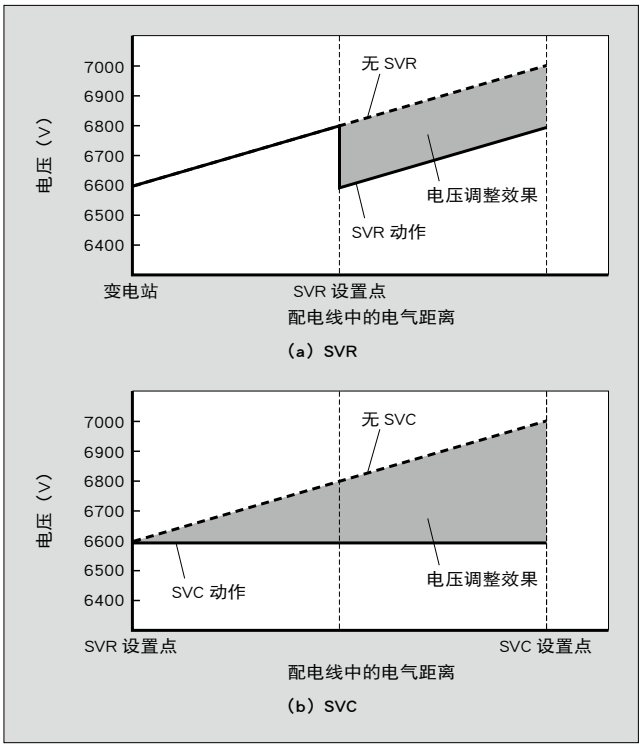

图 1　电压调整的概念图

$$\Delta V=\frac{X\cdot Q}{V} \quad \cdots\cdots(1)$$

ΔV：电压的调整幅度（V）

X：从变电站到 SVC 设置点的电感（Ω）

Q：无功功率（var）

V：系统的电压（V）

利用 SVC 的电压控制是根据 SVC 设置点上测量到的电压和目标电压之差，通过输出必要的无功功率进行控制。

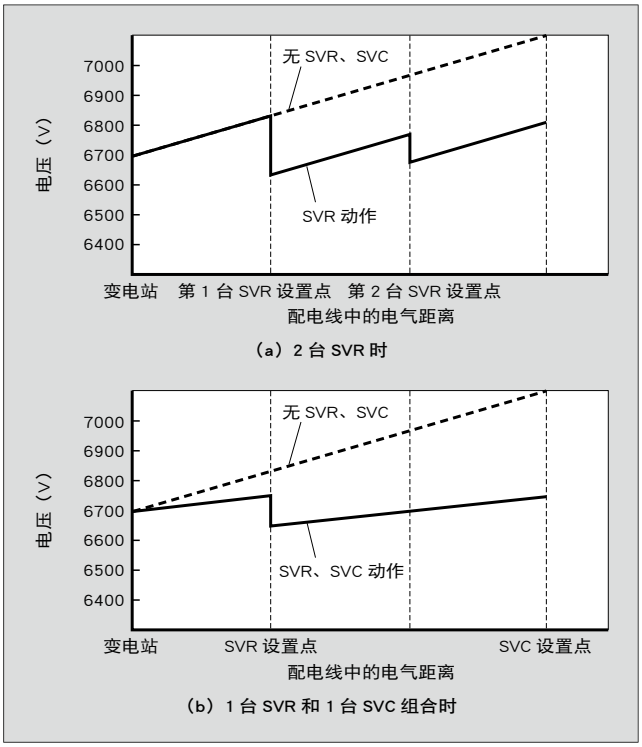

图 2　以多台进行电压调整的概念图

由于 SVC 的无功功率可以连续输出，因此如**图 1**(b)所示，电压调整范围是连续的。

SVC 在来自变电站的电感变大的位置，即设置在越远离变电站的位置上，越能够比设置在靠近变电站的位置上更好地调整电压。因此，利用太阳能发电等在远离变电站的地点发生电压上升等问题时，使用 SVC 调整电压将十分有效。此外，如果拟用 SVR 对应太阳能发电等导致的剧烈电压变动，SVR 的机械抽头动作次数则会增加，甚至还可能缩短 SVR 的更换时期。另一方面，如果使用 SVC，控制剧烈的电压变动时没有机械动作，因此不会缩短更换周期。

考虑到 SVR 和 SVC 的特点，我们采用了在变电站侧设置 SVR，在配电线的末端侧设置 SVC 的方法，以便发挥各自的特长。**图 2** 为设置 2 台 SVR 时和分别各设置 1 台 SVR 和 SVC 时的电压调整概念图。

在**图 2**(a)中，虽然利用 2 台 SVR 进行了电压调整，但却在末端发生了电压上升。另一方面，在**图 2**(b)中通过利用 SVR 和 SVC，抑制了整个系统的电压上升。特别是末端的电压上升在 SVC 的控制下、变电站侧的电压上升在 SVR 的控制下均得到了抑制。这样一来，就可以通过现有 SVR 和 SVC 的协调配合，使整个系统的电压保持稳固。

另外，SVC 分为两种，一种是通过控制电抗器等中流动的电流来产生无功功率的他励式 SVC，另一种是利用自我灭弧型开关元件产生任意相位的电流或者电压，从而产生无功功率的自励式 SVC。下面就富士电机开发的他励式和自励式的配电系统用 SVC 进行介绍。

2.2　他励式配电系统用 SVC 的构成

一般而言，他励式配电系统用 SVC 采用的是利用半导体闸流管，通过直接开关电抗器中流动的电流进行控制的半导体闸流管控制电抗器方式（TCR：Thyristor Controlled Reactor）。该方式是利用半导体闸流管直接开关电抗器的电流，因此需要高次谐波滤波器。对此，富士电机与东北电力株式会社联手共同研究，利用运用了磁通控制技术的可变电感器，开发出新型他励式配电系统用 SVC[1]。该方式可以利用直流电流控制电抗器中流动的电流，因此不需要高次谐波滤波器，能够实现构造比原来更加简单的 SVC。

新型他励式配电系统用 SVC 的基本原理如**图 3** 所示。与传统他励式配电系统用 SVC 的原理不同，磁心中安装有交流绕组和控制绕组，控制绕组中流动直流电流时会发生磁饱和，使有效导磁率减少。可以利用这一原理控制磁通密度，使导磁率变化，从而控制有效电感，调整系统中流入的无功功率。主电路可仅以铁芯和绕组构成，因此能够实现电涌耐受性强且可以轻松确保可靠性的构造。此外，由于调整无功功率输出的控制电流为直流，因此控制电路和软件的运算法

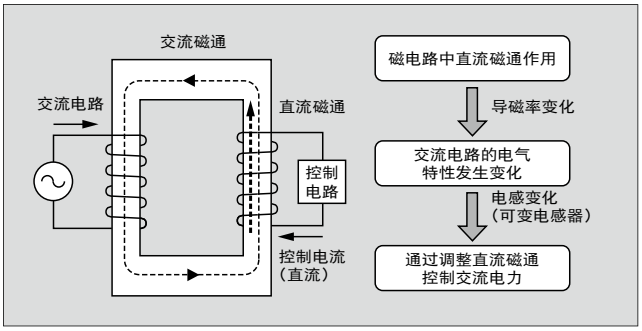

图 3　他励式配电系统用 SVC 的基本原理

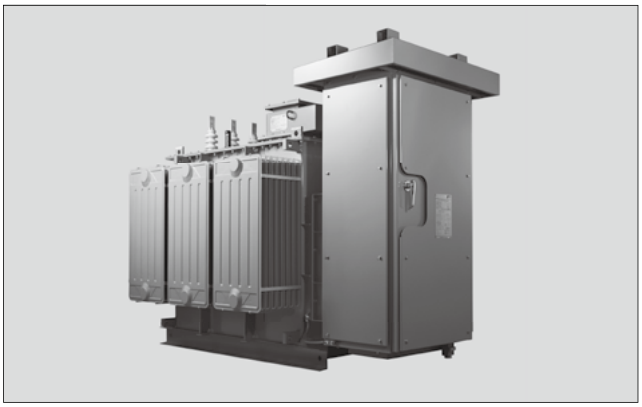

图 4　他励式配电系统用 SVC

表 1　他励式配电系统用 SVC 的规格

项目	规格
额定容量	300 kVA
可变容量	0 ～ 300 kvar（滞后）
额定电压	6600 V
频率	50/60 Hz
冷却方式	自然风冷
重量	4000 kg 以下
外形尺寸	W2500×D1500×H2000（mm）
主电路	可变电感器 （无高次谐波滤波器）

则也可以简单地构建。

所开发的他励式配电系统用 SVC 的外观如**图 4** 所示，规格如**表 1** 所示。

2.3 自励式配电系统用 SVC 的构成

自励式配电系统用 SVC 是利用自我灭弧型开关元件调整无功功率，同时调整电压的装置。传统的自励式配电系统用 SVC 采用的是 Si（硅）半导体元件，难以实现高耐压和高频开关，可减少的功耗和噪音非常有限。因此，旧型号必须使用冷却风扇，维护性不佳，且需要安装在两根电线杆上。

对此，富士电机以实现不需要冷却风扇的自励式配电系统用 SVC 为目标，将 SiC（碳化硅）元件作为替代 Si 元件的功率半导体元件使用，推进 SVC 的开发。与 Si 相比，SiC 是一种可实现高耐压和高频开关的半导体材料。目前我们正在开发并应用 3.3 kV 200 A 的 SiC 功率半导体。所开发的自励式配电系统用 SVC 的电路如**图 5** 所示，规格如**表 2** 所示。

自励式配电系统用 SVC 由三电平变频器和互联变压器构成，其中三电平变频器利用了由 3.3 kV 的 SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）和 SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）组成的 SiC 模块。通过实施热分析，可以预测本构成能够达到不需要冷却风扇的自然风冷效果。

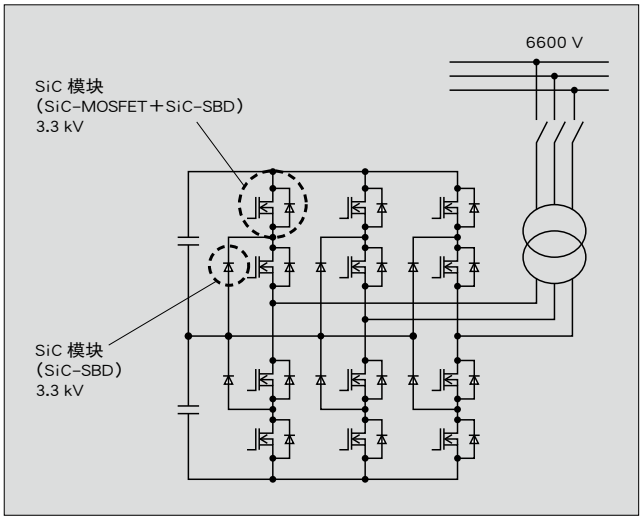

图 5　自励式配电系统用 SVC 的电路

表 2　自励式配电系统用 SVC 的规格

项目	规格
额定容量	300 kVA
可变容量	0～300 kvar（超前、滞后）
额定电压	6600 V
频率	50/60 Hz
冷却方式	自然风冷
重量	1800 kg 以下（60 Hz）
外形尺寸	W1300×D1000×H2500（mm）以内
主电路	变压器、变频器

与他励式配电系统用 SVC 相比，应用了 SiC 元件的自励式配电系统用 SVC 更加轻量，具备可安装在一根柱子上的重量和体积。

预定 2017 年度在一般财团法人 电力中央研究所的赤城试验中心进行实证试验，2018 年度在电力公司的现场进行实证。

该自励式配电系统用 SVC 的成果，是通过实施国立研究开发法人 新能源・产业技术综合开发机构（NEDO）的“分布式能源新一代电力网构建实证业务”而获得的。

3　配电系统中 SVC 的动作

为了确认利用新型他励式配电系统用 SVC 进行电压调整时的动作，我们与东北电力株式会社合作，在东北电力株式会社管辖区域内的实际配电线中实施了现场试验[2],[3]。现场试验的系统图如**图 6** 所示，设置情况如**图 7** 所示。

现场试验的结果如**图 8** 和**表 3** 所示。**图 8** 为设置他励式配电系统用 SVC 前后 1 天内的电压变化示例。在本示例中，他励式配电系统用 SVC 的控制方式，采用的是在超过上限电压（6700 V）时输出无功功率，抑制电压上升的方式。在设置他励式配电系统用 SVC 前，对象系统为平均电压较高的系统，会在短时间内产生超过 6800 V 的电压。设置后，最大电压和平均电压下降，确认到可以抑制电压上升，而且，还具有抑制剧烈电压变动的效果。

此外还发现，与设置他励式配电系统用 SVC 之前相比，设置后系统内 SVR-2 一天的动作次数有所减少。一般而言，在同一系统中设置 SVC 和 SVR 时，可能会发生由于控制相互干扰而导致 SVR 动作次数变多的振荡现象，以及由于控制偏向 SVC 而导致 SVR 不动作的问题。但是，考虑到

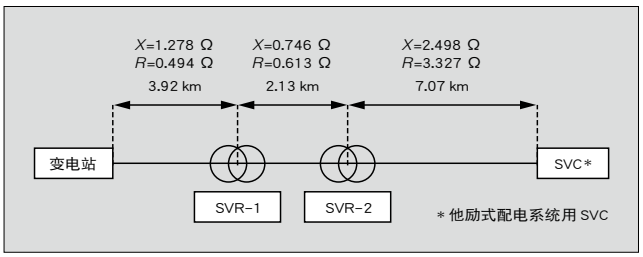

图 6　现场试验系统图

图 7　现场试验中他励式配电系统用 SVC 的设置情况

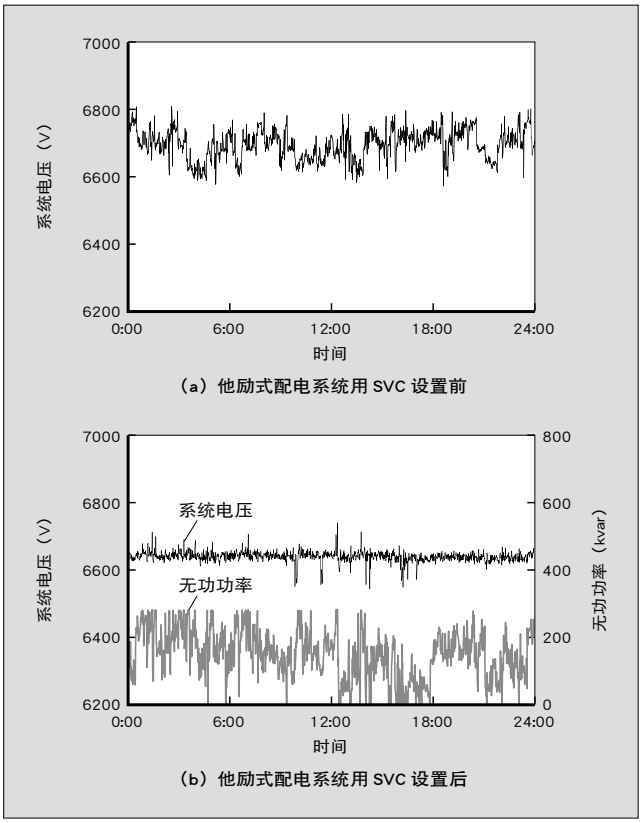

图 8　现场试验结果的示例

表 3　现场试验的结果

项目	试验结果	
	设置前	设置后
平均电压	6680 V	6639 V
最大电压	6838 V	6740 V
最小电压	6512 V	6543 V
电压管理范围内的频率 *1	72.9%	99.9%
平均无功电能	—	146 kvar
最大电压变化 *2	210 V	120 V
SVR-2 的动作次数	15 次	5 次

*1：假设管理范围在 6350 V 至 6720 V，将 1 天作为 100% 时，电压在范围内的比例
*2：当前电压数据与 1 分钟前电压数据的差分绝对值中最大的值

SVR 的设置位置和整定值，通过实施适当的 SVC 控制和整定，可以抑制振荡等问题的发生。在本次现场试验中，确认到未发生 SVR 动作次数变多等问题，结果良好，可以协调配合控制 SVR 和他励式配电系统用 SVC。因此可知，如果太阳能发电导入增加，其输出变动就会成为问题，但是具有可抑制因其而导致的 SVR 动作次数增加的效果。

4　后记

本文针对配电系统用 SVC，对电压调整方法以及自励式、他励式的原理和构成进行了阐述。在他励式配电系统用 SVC 的现场试验中，可以确认到抑制电压上升的效果，利用 SVC 可为解决以太阳能发电的配电系统电压变动问题做出贡献。

富士电机今后将继续开发配电系统用 SVC 产品，提供可为扩大太阳能发电等可再生能源的导入做贡献的装置。

最后，我们对为他励式配电系统用 SVC 的开发、设计和实证试验给予大力指导和协助的东北电力株式会社，以及为自励式 SVC 的开发、设计给予大力指导的国立研究开发法人 新能源・产业技术综合开发机构（NEDO）的“分布式能源新一代电力网建立实证业务”的相关各单位，表示深深地感谢。

参考文献

⑴　有松健司ほか. 磁束制御型高圧電圧調整装置の制御特性およびフィールド試験結果. 平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会 No.28.
⑵　大日向敬ほか. 磁束制御型高圧電圧調整装置の協調動作に関する一考察. 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会 No.171.
⑶　大日向敬ほか. 磁束制御型高圧電圧調整装置の協調動作に関する一考察（その 2）. 平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会 No.199.

小岛　武彦
从事电力、能源控制系统的开发及工程设计业务。现为富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部社会系统事业部新一代配电项目部担当部长。电气学会会员。

矶谷　仁志
从事配电自动化系统的开发及工程设计业务。现为富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部社会系统事业部新一代配电项目部课长助理。

山田　　真
从事电力流通领域的控制、保护和分析装置的企划、开发和工程设计业务。现为富士电机株式会社发电和社会基础设施事业本部社会系统事业部电力流通综合技术部课长助理。电气学会会员。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。