

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181516

# 弱联系电网中 SVC 引起的次同步振荡分析及其抑制措施研究

孙昕炜<sup>1</sup>, 史华勃<sup>1</sup>, 倪江<sup>2</sup>, 魏巍<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司  
经济技术研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 藏中联网工程多站点布置了 SVC 以改善长链式电网的电压调节性能。经过电磁暂态仿真发现, 在藏中联网这类具有长链式、弱联系特征的电网中, SVC 控制参数不当可能引发次同步振荡。为了深入研究此类振荡特性及抑制方法, 建立了线性化的 SVC 和输电网络的电磁暂态模型。采用特征分析的方法, 在两个算例中分析了这种新型次同步振荡的特点。结果表明, 此类次同步振荡是在系统已有的次同步模式当中, 不当的 SVC 控制削弱了次同步阻尼, 从而引发了振荡的产生。且系统中的多台 SVC 对系统振荡阻尼的削弱作用会叠加, 进一步增加次同步振荡风险。最后, 根据此类次同步振荡的特点, 针对性地提出了抑制此类新型次同步振荡的措施。

**关键词:** 弱联系电网; SVC; 次同步振荡; 电磁暂态; 特征分析

## Study of the sub-synchronous oscillation caused by SVC in weak-link power grids and its suppressing method

SUN Xinwei<sup>1</sup>, SHI Huabo<sup>1</sup>, NI Jiang<sup>2</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China;  
2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In several substations of the Central Tibet Linking Project, SVC is used to improve the voltage control features in weak-link power grid. According to electromagnetic transient simulation, improper control parameters of SVC may lead to a novel sub-synchronous oscillation in weak-link power grid. According to further studying the character and suppressing method of this novel sub-synchronous oscillation, a linearized electromagnetic transient model of SVC and power grid is promoted, eigenvalue analysis method is applied to analyze two test systems. The results show that this novel sub-synchronous oscillation happens in a system which has a sub-synchronous mode, improper control parameter of SVC decreases the damping of the sub-synchronous mode, therefore leads to sub-synchronous oscillation. These damping decreasing effects caused by several SVCs are superposed, increasing the probability of sub-synchronous oscillation. Finally, several suppression measures are proposed according to the characters of this novel oscillation.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905200) and Science and Technology Project of State Grid Sichuan Electric Power Company (No. 52199718001W).

**Key words:** weak-link power grids; SVC; sub-synchronous oscillation; electromagnetic transient; eigenvalue analysis

## 0 引言

随着藏中联网工程投运, 西藏电网成功实现和川渝电网的 500 kV 联网, 提高了西藏水电送出能力

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0905200);  
四川省电力公司科技项目资助(52199718001W)

以及西藏电网的安全性。藏中联网工程地处西藏、四川的偏远山区, 输电距离长(超过1 600 km)、沿途下网负荷轻, 交流电网网架结构薄弱。静止无功补偿器(SVC)具有动态电压调节能力, 可有效提升电网的电压稳定性<sup>[1-4]</sup>。藏中联网 500 kV 主网架配置 SVC 可以有效提升西藏电网的电压调节能力, 同时也可提升长链式送出通道的暂态及动态稳定性。

然而,长链式通道配置 SVC 后的次同步振荡问题成为制约 SVC 充分发挥电压调节能力的新因素。在针对西藏电网的电磁暂态仿真中发现,在特定的 SVC 控制参数和网架结构下,长链式通道上各节点的电压可能发生频率在 10~50 Hz 的次同步振荡,机电暂态仿真中未能发现相同现象。该现象的形成原因与主要影响因素尚缺乏深入研究。

本文首先针对含 SVC 的长链式电网进行状态空间建模,考虑了长链式输电线路上的充放电电磁暂态过程。然后,针对含有 SVC 的长链式典型网架进行特征分析,得到其特征频率以及 SVC 控制参数对振荡特性的影响。最后,在西藏电网的电磁暂态模型上对本文所提出的理论进行验证,并且发现多台 SVC 对系统阻尼的削弱作用会产生叠加。本文的研究成果可解释 SVC 在弱联系电网中引发次同步振荡的原因及影响振荡特性的主导因素,所提出的建议对预防弱联系电网的次同步振荡、提升弱联系电网的安全稳定特性具有十分重要的意义。

## 1 电力系统次同步振荡研究现状

对电力系统次同步振荡的研究可以追溯到 1970 年的 Mohave 事件。根据 IEEE 次同步振荡工作组发布的文件,其机理可分为扭振互作用(TI)、感应发电机效应(IGE)<sup>[5-6]</sup>。早期的次同步振荡研究主要关注扭振互作用(TI),是一种发电机轴系参与的机电振荡模式<sup>[7]</sup>。

随着新的控制技术和电力电子设备接入电力系统,出现了新的引发次同步振荡的机理。文献[8]指出电力系统稳定器可能使系统次同步频段阻尼恶化,尤其是速度反馈型电力系统稳定器。更进一步的研究表明,次同步振荡的产生不一定需要同步发电机参与。文献[9]指出直驱风机经弱交流系统并网后可能引发次同步相互作用(Sub-synchronous Interaction, SSI),该机理可以解释新疆哈密直驱风机引发的次同步振荡问题。上述新型电力电子变换器与电网相互作用引发次同步振荡,不存在与发电机轴系的相互作用,应归类为感应发电机效应(IGE)。传统的感应发电机效应主要发生在串补度较高的场合,但是在电力电子控制器参与的情况下,次同步谐振有可能发生在串补度很低甚至完全没有串补度的系统当中,该类电力电子变流器控制参与的感应发电机效应被称作次同步控制相互作用(SSCI)<sup>[10-12]</sup>。此类控制器参与的 SSCI 也可能与 TI 机理相结合<sup>[13]</sup>。关于此类新型次同步振荡的抑制方法,文献[9]提出了采用减小 PI 控制器放大倍数的方法可以有效抑制次同步振荡。文献[14]进一步提出减小该类次同步振荡

的方法分为减小测量延时、优化控制器参数、增加阻尼控制三类方法。

关于 SVC 引发次同步振荡的问题,文献[15]在带 SVC 的西藏电网 RTDS 仿真中记录了次同步振荡的现象,并通过减小 PI 参数的方法消除了振荡,但是尚未见到有文献对 SVC 引发次同步振荡的原因及主导影响因素进行进一步的研究。

综上所述,现有研究尚未对弱联系联网通道上的 SVC 引发的新型次同步振荡特点进行深入分析,为了辨明此类振荡的主导影响因素,以及针对性提出此类振荡的抑制措施,需要进一步开展研究。

## 2 系统建模和特征分析

本节对系统当中的 SVC 准稳态、线路波过程电磁暂态、电感和电容充放电电磁暂态过程进行建模。不考虑电力系统中其他动态元件的响应特性。

### 2.1 Park 变换下的电感、电容模型

在电磁暂态当中,如果将电压、电流的 abc 三相瞬时值作为状态变量,则即便系统到达稳态,瞬时值也时刻随正弦规律变化,给小干扰分析带来困难。因此,通常采用 Park 变换将电压、电流从 abc 坐标系变换到 dq0 坐标系,使得稳态过程中的电压、电流值不随时间变化。

略去推导过程,在 Park 变换下,电感、电容的标么值方程可用式(1)表示。

$$\begin{cases} \frac{X}{\omega_0} s \mathbf{i}_{Ldq} = X \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \mathbf{i}_{Ldq} + \mathbf{u}_{Ldq} \\ \frac{B}{\omega_0} s \mathbf{u}_{Cdq} = B \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{Cdq} + \mathbf{i}_{Cdq} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $s$  为微分算子;电感电流  $\mathbf{i}_{Ldq}$ 、电感电压  $\mathbf{u}_{Ldq}$ 、电容电流  $\mathbf{i}_{Cdq}$ 、电容电压  $\mathbf{u}_{Cdq}$  均为在 dq 坐标系下的值。可定义为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{Ldq} &= [u_{Ld} \quad u_{Lq}]^T, \quad \mathbf{i}_{Ldq} = [i_{Ld} \quad i_{Lq}]^T \\ \mathbf{u}_{Cdq} &= [u_{Cd} \quad u_{Cq}]^T, \quad \mathbf{i}_{Cdq} = [i_{Cd} \quad i_{Cq}]^T \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $u$ 、 $i$  代表电压、电流;下标  $L$ 、 $C$  代表电感、电容;下标  $d$ 、 $q$  分别代表  $d$ 、 $q$  轴分量。

传输线的波过程模拟可以采用  $\pi$  等值模型,将线路等效成集中式的电感、电容进行分析。如果线路过长,单个  $\pi$  模型单元模拟的精确程度不足,可采用多个  $\pi$  模型单元串联的方式模拟线路上的电磁暂态过程。在本文研究的次同步频段,单个  $\pi$  单元代替的线路长度不超过 200 km 时,可认为其精确反映了线路的电磁暂态特性。

## 2.2 SVC 准稳态模型

静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)结构如图 1 所示。SVC 主要由晶闸管控制电抗器 TCR 和滤波器(三次谐波滤波器组 FC3、五次谐波滤波器组 FC5)组成(根据实际情况,可能有多组滤波器,此处仅为示意图)。其中,交流滤波器组由静态电感、电容组成,其建模方法同 2.1 节。此处仅对 TCR 支路的建模做说明。TCR 准稳态模型控制框图如图 2 所示。该 SVC 采用电压反馈的 PI 控制作为其基本控制逻辑, $T_v$  是代表整个 TCR 从测量到输出总时延环节的时间常数,包括量测延时、控制延时和晶闸管导通延时。

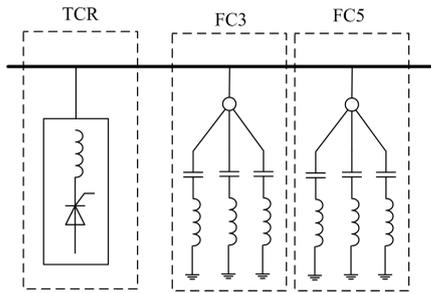


图 1 SVC 结构图

Fig. 1 Diagram of SVC

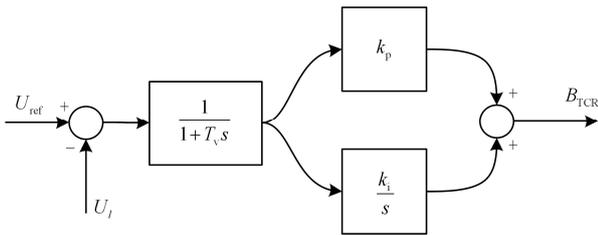


图 2 SVC 控制框图

Fig. 2 Control block diagram of SVC

上述准稳态模型可用式(3)表示。

$$\begin{cases} sx = k_i(U_{ref} - U_i) \\ sB_{TCR} = \frac{1}{T_v}x - \frac{1}{T_v}B_{TCR} + \frac{k_p}{T_v}(U_{ref} - U_i) \\ \frac{1}{\omega_0} s \mathbf{I}_{TCR} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \mathbf{I}_{TCR} - B_{TCR} \mathbf{U}_{ldq} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $s$  为微分算子;  $\mathbf{I}_{TCR}$  为  $dq$  坐标系下 TCR 支路的电流;  $B_{TCR}$  为 TCR 支路的导纳;  $\mathbf{U}_{ldq}$  为 TCR 支路的电压;  $U_i$  为 TCR 支路电压幅值。其中  $\mathbf{I}_{TCR}$ 、 $\mathbf{U}_{ldq}$ 、 $U_i$  的定义式如(4)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{TCR} &= \begin{bmatrix} I_{TCRd} & I_{TCRq} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{U}_{ldq} &= \begin{bmatrix} U_{ld} & U_{lq} \end{bmatrix}^T \\ U_i &= \sqrt{U_{ld}^2 + U_{lq}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $I_{TCRd}$ 、 $I_{TCRq}$  分别为 TCR 支路电流的  $d$  轴、 $q$  轴分量;  $U_{ld}$ 、 $U_{lq}$  分别为 TCR 支路电压的  $d$  轴、 $q$  轴分量。

## 2.3 系统建模和特征值求取

系统中的变压器、输电线路、负荷可简化成电感、电容、电阻构成的网络,再采用 2.1 节中的方法可以得到电力网络在 Park 变换下的电磁暂态模型;发电机采用电压源和次暂态电抗  $X_d''$  串联的模型模拟;SVC 采用 2.2 节中的模型模拟。将上述模型联立可求得系统的方程。

对系统的方程进行线性化,最终可将该问题转化为  $\mathbf{A}\Delta\mathbf{x} = \lambda\mathbf{B}\Delta\mathbf{x}$  的广义特征值问题。采用一个收敛的潮流方程作为平衡状态,可以求得矩阵  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$  中各个元素的具体数值,进行特征值计算可获得系统特征模态。

## 3 算例分析

本节采用简单长链式电网系统以及藏中联网系统为例进行分析,阐述 SVC 引发次同步谐振的特点及主要影响因素。

### 3.1 简单长链式电网

#### 3.1.1 算例电网结构

本文采用的简单长链式电网结构如图 2 所示,线路参数采用西藏电网波密—左贡线路参数,线路长度为 1 221 km,线路首端带无穷大电源,末端接入 500 kV 主变及 SVC。

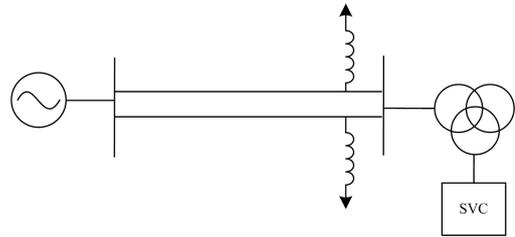


图 3 简单长链式电网系统结构

Fig. 3 Structure of single long-chain power grid

本文所用的简单长链式电网系统基本参数如下。

双回线路的每一回参数:  $r=0.0157 \Omega/\text{km}$ ;

$x=0.2973 \Omega/\text{km}$ ;  $b=3.94 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ 。

电源: 理想电压源,电压有效值为 525 kV。

变压器:  $S=750 \text{ MVA}$ ,  $V_{12}\%=12\%$ ,  $V_{13}\%=44\%$ ,  $V_{23}\%=29\%$ ,  $U_1=550 \text{ kV}$ ,  $U_2=242 \text{ kV}$ ,  $U_3=36 \text{ kV}$ ,  $P_{12}=1614 \text{ kW}$ ,  $P_{13}=545.1 \text{ kW}$ ,  $P_{23}=510 \text{ kW}$ 。两台并联。

高抗: 根据线路长度合理配置,对于 1 221 km 长度线路选取值为 1 500 Mvar。

SVC: 容量 60 Mvar, 延时环节  $T_v=0.029 \text{ s}$ 。

### 3.1.2 简单长链式电网系统特征分析结果和时域仿真结果对比

由于双回线路长度较长，主导模式的固有频率可能落入次同步频段(10~50 Hz)。

采用本文第 2 节中给出的建模和线性化分析方法，该系统特征根分布情况如图 4 所示。

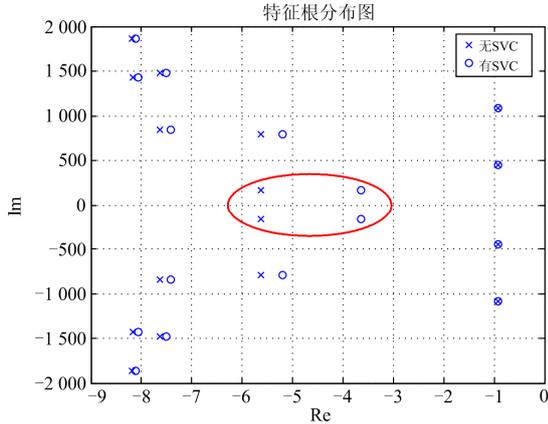


图 4 有、无 SVC 情况下的系统特征值分析结果(无 SVC 系统中已经包含了 SVC 的滤波器，有 SVC 系统中 SVC 的 PI 参数为  $k_p=4$ ;  $k_i=10$ )

Fig. 4 Comparison of eigenvalues between single long-chain power grid with SVC and without SVC ( $k_p=4$ ;  $k_i=10$ )

由图 4 可知，对比有、无 SVC 的特征根分布图，可以看到有 SVC 的系统有一对最接近实轴的特征值明显向右平移。下文将这对特征值对应的振荡模式称为主导振荡模式。SVC 主要影响了系统主导振荡模式的阻尼，对其他振荡模式影响不大。

相同系统的电磁暂态仿真结果可以验证特征值分析结果的正确性，如图 5、图 6 所示。在 PSCAD 中对系统添加单瞬故障，从恢复过程中电压变化曲线上可看出系统固有频率约为 25 Hz，与特征值分析得到的结果一致。并且在有 SVC 的情况下，该振荡频率基本不变，但是振荡的阻尼明显减小，该现象也与特征值分析的结果一致。

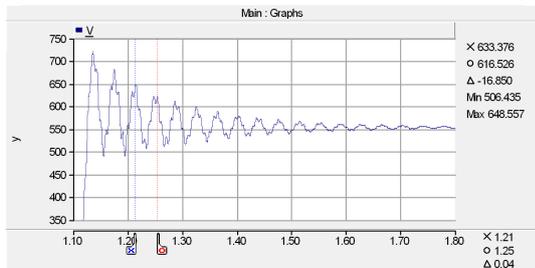


图 5 无 SVC 情况下长链式系统末端单瞬故障后的电压曲线  
Fig. 5 Voltage curve of single long-chain power grid without SVC under transient single-phase grounding fault

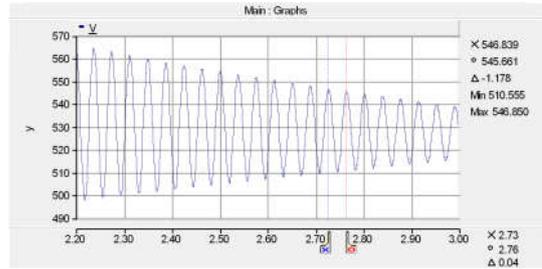


图 6 有 SVC 情况下长链式系统末端单瞬故障后的电压曲线  
Fig. 6 Voltage curve of single long-chain power grid with SVC under transient single-phase grounding fault

电磁暂态仿真结果还可以说明主导振荡模式分析方法的有效性。从仿真得到的电压振荡曲线来看，其振荡曲线主要体现了主导振荡模式的特征，且 SVC 的引入会显著影响到主导振荡模式的阻尼。下文将利用主导振荡模式这一概念，对影响系统稳定性的因素进行详细分析。

### 3.1.3 系统结构对电磁振荡特性的影响

线路长度影响到弱联系电网的结构，从而可能会改变电网的特征频率。将线路长度从 244 km 逐渐增加至 1 221 km，系统特征频率逐渐减小，如图 7 所示(从 69.5 Hz 降低至 26.1 Hz)，系统的特征值如表 1 所示。可以看到，在不考虑 SVC 接入的情况下，由于系统中电阻的存在，电磁振荡模式的特征值始终在左半平面，系统是稳定的，也不会发生自激振荡。

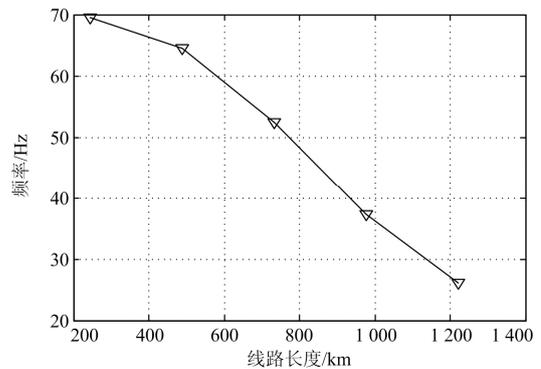


图 7 简单长链式电网系统线路长度与主导振荡模式频率的关系

Fig. 7 Relationship curve of transmission line length and leading mode frequency in single long-chain power grid

### 3.1.4 SVC 控制器参数对电磁振荡特性的影响

分析表明不同的 SVC 控制参数对主导振荡模式的特征值虚部影响很小，主要影响其特征值的实部，即改变系统的阻尼特性。下面重点对不同控制器参数下系统的阻尼特性进行研究。

表 1 不同线路长度的简单长链式电网系统  
主导模式特征值分析结果

Table 1 Eigenvalue of single long-chain power grid  
with different transmission line length

线路长度/km	主导模式特征值
244.19	$-0.528\ 75 \pm 436.52i$
488.38	$-1.754\ 88 \pm 405.53i$
732.57	$-4.826\ 82 \pm 329.76i$
976.76	$-5.761\ 46 \pm 234.63i$
1 220.95	$-5.632\ 29 \pm 164.06i$

分析结果如图 8、图 9 所示, 其中图 8 为不同线路长度的简单长链式电网系统, 保持 SVC 的积分因子  $k_i=0$ , 比例因子  $k_p$  从 0 变化至 15 时, 系统主导振荡模式的实部变化情况; 图 9 为保持比例增益  $k_p=0$ ,  $k_i$  从 0 增大至 3 000, 系统主导特征模式特征值实部的变化情况。

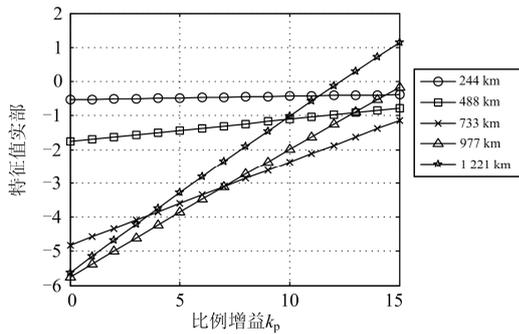


图 8 长链式电网系统不同的 SVC 比例增益与主导振荡模式特征值实部的关系

Fig. 8 Relationship curve of SVC proportional gain  $k_p$  and leading mode eigenvalue real part in single long-chain power grid

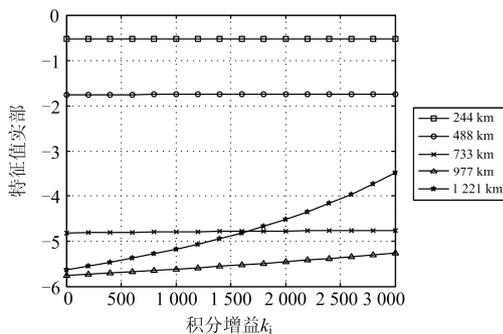


图 9 简单长链式电网系统不同的 SVC 积分增益与主导振荡模式特征值实部的关系

Fig. 9 Relationship of SVC integrating gain  $k_i$  and leading mode eigenvalue real part in single long-chain power grid

分析结果表明, 综合考虑系统的控制器参数(考虑影响最大的  $k_p$  参数)、线路长度对简单长链式电

网系统主导模式特征根实部的影响, 当线路长度较短时, 增大 SVC 控制参数基本不会导致特征根实部的增大。随着线路长度的增加, 系统强度减弱, 系统特征频率减小, 增大  $k_p$ 、 $k_i$  对系统稳定性的影响越来越大。当系统电磁振荡的特征频率为 26.1 Hz 时, 设置  $k_p=15$ 、 $k_i=0$ , 系统将会振荡发散。

综上所述, 不同结构特征下, 系统阻尼和调节参数的关系是不同的。如果系统振荡频率较高, 增大调节器的控制增益对系统阻尼的削弱作用很小(如 244 km 和 488 km 时的情况)。但是如果系统振荡频率较低, 则不需要很高的调节速率, 就有可能出现振荡发散的情况。这就说明 SVC 引发次同步振荡的现象是 SVC 的控制策略与长链式、弱联系电网结构特性发生相互作用的结果, 是一种次同步控制相互作用(SSCI)。在简单长链式电网系统的主导模式振荡频率下降至次同步频段时, 振荡发散较容易发生。

### 3.2 藏中电网算例

#### 3.2.1 藏中电网结构

藏中电网 500 kV 网架结构如图 10 所示, 其中许木站沿 500 kV 输电走廊至澜沧江长度超过 1 200 km, 沿线的电源、负荷落点少, 线路传输功率通常较低。

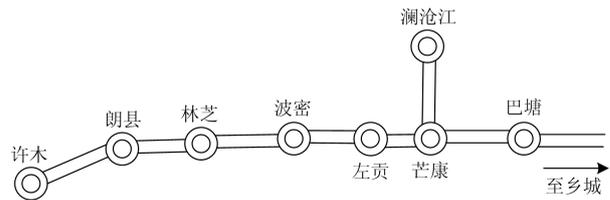


图 10 藏中联网工程 500 kV 网架结构

Fig. 10 Structure of 500 kV Central Tibet Linking Project

藏中电网虽然比 3.1 节中给出的长链式电网结构更为复杂, 但是由于存在长链式的输电结构, 对其进行特征分析, 也可以发现次同步频段的主导振荡模式。

特征分析表明西藏电网的电磁振荡特征频率同电网结构密切相关。在西藏—四川联网的正常运行方式下, 系统固有电磁振荡频率为 43.7 Hz, 若将巴塘到乡城双回断开, 西藏电网带巴塘电网孤网运行情况下, 其固有振荡频率会进一步下降为 22.5 Hz。

#### 3.2.2 影响藏中电网电磁振荡阻尼的因素

由于藏中电网为长链式结构, 电压/无功灵敏度, 使得其稳态电压调节十分困难, 需要在多个站点布置 SVC 以满足电压调节需要。藏中电网布置 SVC 在三个站点, 分别为朗县、波密、芒康, 其中 TCR 支路容量均为  $2 \times 30$  Mvar。针对藏中联网工程

的实际需求,有两个关键问题需要进行研究:其一,多台 SVC 对系统阻尼的削弱作用是否会同时起作用;其二,是否存在关键的联络线,当其停运后会显著增加电网的振荡风险,对系统的固有模式的振荡阻尼特性有显著的恶化。

图 11 展示了西藏—四川联网运行方式下,不同站点 SVC 控制参数对电网阻尼特性的敏感性大小。可以看到不同站点的 SVC 对系统阻尼的削弱程度有显著差异,并且当三站同时改变  $k_p$  参数时,系统的阻尼将会更大程度被削弱,且效果约等于三者作用的线性叠加。

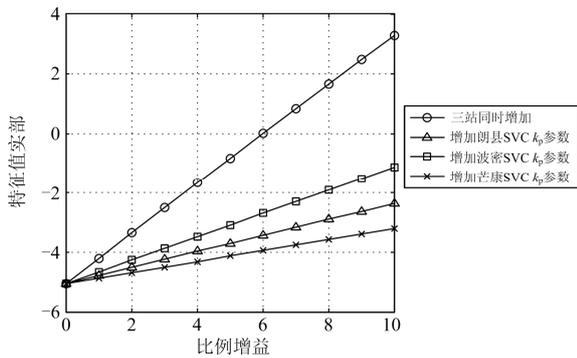


图 11 西藏—四川联网方式下增加 SVC 的比例增益对主导模式特征值实部的影响

Fig. 11 Relationship curve of SVC proportional gain  $k_p$  and leading mode eigenvalue real part under Tibet-Sichuan connected operation mode

再来对比电网结构变化对系统电磁振荡阻尼特性的影响。3.2.1 节已经分析了西藏—四川联网方式和西藏孤网方式下系统的主导振荡模式频率有显著差别。图 12 展示了两种方式下特征值实部随 SVC

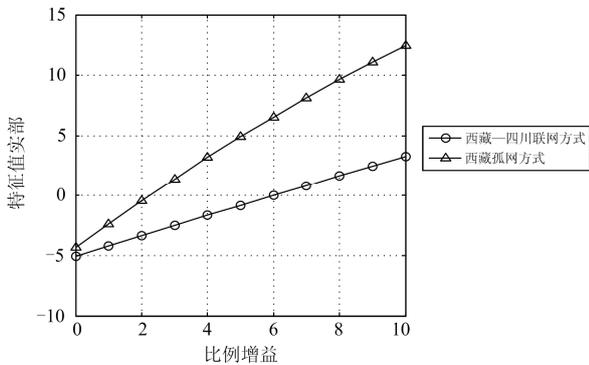


图 12 西藏—四川联网方式和西藏孤网方式下增加 SVC 的比例增益对主导模式特征值实部的影响对比

Fig. 12 Relationship curve of SVC proportional gain  $k_p$  and leading mode eigenvalue real part under Tibet-Sichuan connected operation mode and Tibet islanding operation mode

比例增益的变化情况(此处均为同时改变所有站点的 SVC 比例增益)。可以看到,孤网方式下的特征值实部随比例增益的增加上升更快,说明西藏孤网模式下系统振荡更容易发生。

综上所述,与 3.1 节中的长链式电网情况相似,SVC 的投入会显著削弱主导振荡模式的阻尼,且和系统结构密切相关。此外,还可以发现三个站点的 SVC 对系统阻尼的削弱具有协同作用。因此,在这种具有次同步振荡风险的电网中,整定 SVC 的参数需要考虑多台 SVC 的共同作用,且需要考虑多种可能的运行方式,才能有效防止次同步振荡的发生。

#### 4 抑制振荡的技术措施

目前,工程上可采用的抑制振荡的技术措施主要有如下三点。

##### (1) 减小控制器增益

减小控制器增益是抑制 SVC 引发次同步振荡现象最简单直接的方法。根据第 3 节的分析,在 SVC 引发的次同步振荡中,减小 SVC 的控制器增益总是可以消除振荡。但是减小控制器增益也会给系统带来坏的影响,主要是会导致系统的电压调节性能恶化。SVC 在弱联系电网中所发挥的重要作用优化电网的电压调节性能。例如新投线路或者负荷剧烈变化的情况下,使得电网的电压维持在相对平稳的水平。如果 SVC 的控制增益太小,将使得其电压调节性能得不到充分发挥,弱联系电网本身的无功电压特性会使得电压水平发生大幅度变化,影响电网安全稳定运行。

##### (2) SVC 增益动态控制

现有的固定参数控制策略如果要适应所有可能的电网运行方式,必然需要留出足够的裕度,设定的 PI 增益会很小,不利于充分发挥 SVC 的电压调节能力。因此,已经有研究提出了 SVC 自适应控制方法,可以自动调节平抑 SVC 的输出振荡<sup>[16-17]</sup>。但是现有的 SVC 自适应控制是一种本地的控制,且为考虑电网的固有模态,需要在振荡发生后再自行调节。第 3 节的分析已经表明,电网结构会对 SVC 引发次同步振荡风险产生显著的影响。当系统中重要的输电线路、变压器因故障或者检修退出运行时,由于网架结构的削弱,可能导致系统振荡更容易发生。因此,广域的控制是解决该问题的一种可行方案<sup>[18]</sup>。SVC 增益可根据电网运行方式的变化进行动态调节,可达到更佳的控制效果。

##### (3) SVC 的阻尼控制策略

文献[19-23]提出了采用 SVC 抑制常规的次同步振荡方法。相关研究可说明在引入功率反馈和适

当的阻尼环节后, SVC 可在次同步频段提供阻尼。这种思路可以为抑制 SVC 自身引发次同步振荡提供借鉴, 可以进一步深入研究。相关研究需要围绕以下的问题展开: 1) 在弱联系电网中, SVC 中引入阻尼控制环节可在多大范围内提供负阻尼, 对不同运行方式的适应性如何; 2) 阻尼控制环节对 SVC 的电压调节性能有何影响, 是否可以在不牺牲电压调节性能的前提下提升系统的阻尼。

## 5 结论

本文首先建立了基于 Park 变换的输电线路、变压器以及 SVC 的电磁暂态模型, 建立线性化模型, 将系统稳定性问题转化为特征值求解问题。进一步地, 基于长链式网架和藏中电网实际网架进行了特征分析。特征分析的结果表明, 长链式网架上的充放电波过程导致输电系统具有次暂态频段的固有频率(10~50 Hz), 如果 SVC 的控制器参数选择不当, 将会显著削弱系统固有频率的阻尼, 甚至引发系统在次同步频段的自激振荡。进一步的敏感性分析表明, SVC 引发的次同步振荡是长链式、弱联系的电网结构和 SVC 的控制策略之间发生相互作用, 在电网的主导振荡模式进入次同步频段后, 这种振荡容易发生。因此, 这种特性对 SVC 的参数整定提出了新的要求, 具体为: 1) 多个 SVC 的控制对系统的阻尼削弱具有协同作用, 需要进行统一整定; 2) 需要考虑多种可能的运行方式下 SVC 引发次同步谐振的风险。本文还提出了抑制振荡的 3 条技术措施, 其中 SVC 的阻尼控制策略在该类新型次同步振荡中的应用还需要进一步研究。

## 参考文献

- [1] 蔡晖, 张文嘉, 万振东, 等. 苏州南部电网的电压稳定问题及无功补偿策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1): 110-116.  
CAI Hui, ZHANG Wenjia, WAN Zhendong, et al. Study on voltage stability and reactive compensation strategy in Southern Power Grid of Suzhou[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(1): 110-116.
- [2] 谢惠藩, 王海军, 张楠, 等. SVC 在南方电网西电东送中的应用研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(增刊 1): 138-142.  
XIE Huifan, WANG Haijun, ZHANG Nan, et al. Study on the application of SVC to power transmitted from West to East in China Southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(S1): 138-142.
- [3] 郑国华. 静止无功补偿装置(SVC)在泉州新塘 220 kV 变电站的应用[J]. 电工技术, 2010(4): 12-15.  
ZHENG Guohua. The application of SVC in Xintang 220 kV Station of Quanzhou[J]. Electric Engineering, 2010(4): 12-15.
- [4] 唐莉. 用 SVC 提高区域电网的动态电压稳定性[J]. 自动化应用, 2011(8): 62-66.  
TANG Li. Using SVC to improve dynamic voltage stability of regional power grid[J]. Application of Automation, 2011(8): 62-66.
- [5] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Proposed terms and definitions for subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(2): 506-511.
- [6] Subsynchronous Resonance Working Group of the System Dynamic Performance Subcommittee. Reader's guide to subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 150-157.
- [7] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] 吴熙, 蒋平, 胡弢. 电力系统稳定器对次同步振荡的影响及其机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 22(31): 56-63.  
WU Xi, JIANG Ping, HU Tao. Impact of power system stabilizer on subsynchronous oscillation and its mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 22(31): 56-63.
- [9] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.  
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [10] MA H T, BROGAN P B, JENSEN K H, et al. Sub-synchronous control interaction studies between full-converter wind turbines and series-compensated AC transmission lines[C] // Proceedings of the 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA: 1-5.
- [11] CHENG Y Z, SAHNI N, MUTHUMUNI D, et al. Reactance scan crossover-based approach for investigating SSCI concerns for DFIG-based Wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 742-751.
- [12] 陈斐泓, 杨健维, 廖凯, 等. 基于频率扫描的双馈风电机组次同步控制相互作用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 84-91.  
CHEN Feihong, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Sub-synchronous control interaction analysis in

- doubly-fed induction generator based on frequency scanning[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(24): 84-91.
- [13] 时伯年, 李树鹏, 梅红明, 等. 含常规直流和柔性直流的交直流混合系统次同步振荡抑制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(20): 113-118.  
SHI Bonian, LI Shupeng, MEI Hongming, et al. Research on the SSO restraining of hybrid system containing LCC\_HVDC and VSC\_HVDC[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(20): 113-118.
- [14] GAO Feng, WU Bingqing, ZHANG Baohui, et al. The mechanism analysis of sub-synchronous oscillation in PMSG wind plants[C] // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe), June 6-9, 2017, Milan, Italy.
- [15] 胡涛, 刘翀, 班连庚, 等. 藏中电网 SVC 控制策略实时仿真及参数优化[J]. *电网技术*, 2014, 38(4): 1001-1007.  
HU Tao, LIU Chong, BAN Liangeng, et al. Real-time simulation and parameter optimization of SVC control strategy for Central-Tibet Power Grid[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(4): 1001-1007.
- [16] 李兰芳. 输电系统 SVC 电压调节器增益自适应控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(3): 61-66.  
LI Lanfang. Gain adaptive control method of the voltage regulator for SVC in transmission system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(3): 61-66.
- [17] 周晓华, 张银, 刘胜永, 等. 静止无功补偿器新型自适应动态规划电压控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(12): 77-84.  
ZHOU Xiaohua, ZHANG Yin, LIU Shengyong, et al. Voltage control of static var compensator based on novel adaptive dynamic programming[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(12): 77-84.
- [18] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [19] 顾威, 李兴源, 陈建国, 等. 基于瞬时无功理论的 SVC 抑制次同步振荡的附加控制设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(5): 107-111.  
GU Wei, LI Xingyuan, CHEN Jianguo, et al. Additional control design of SVC for mitigating subsynchronous oscillation based on instantaneous reactive power theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(5): 107-111.
- [20] 岑炳成, 刘涤成, 董飞飞, 等. 抑制次同步振荡的 SVC 非线性控制方法[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(4): 129-135.  
CEN Bingcheng, LIU Dicheng, DONG Feifei, et al. Nonlinear control method of static var compensator for damping subsynchronous oscillation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(4): 129-135.
- [21] JOORABIAN M, RAZZAZ M, EBADI M, et al. Damping sub-synchronous oscillations of power system using ANN-based controlled SVC[C] // 2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, May 22-24, 2008, Brasov, Romania.
- [22] SURIYAARACHCHI D H R, ANNAKAGE U D, KARAWITA C, et al. Chopra Application of an SVC to damp sub-synchronous interaction between wind farms and series compensated transmission lines[C] // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA.
- [23] SREERANGANAYAKULU J, MARUTHESWAR G V, ANJANEYULU K S R. Mitigation of sub synchronous resonance oscillations using static var compensator[C] // 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), March 3-5, 2016, Chennai, India.

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-03-08

作者简介:

孙昕炜(1991—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: sunxw09@126.com

史华勃(1987—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(编辑 许威)