

光伏、火电打捆经串补送出系统的次同步振荡研究

陈钦磊¹, 郭春林¹, 于 鹏¹, 张明智¹, 李红军²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 100761)

Research on Subsynchronous Oscillations in Power System With Photovoltaic-thermal-bundled Power Transmitted by Series Compensation

CHEN Qinlei¹, GUO Chunlin¹, YU Peng¹, ZHANG Mingzhi¹, LI Hongjun²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 100761, China)

摘 要: 光伏、火电捆绑经过含串补的交流系统送出是一种合理可行的并网方案。本文基于加入了并网光伏的 IEEE 次同步振荡第一标准模型, 利用复转矩系数法和时域仿真法分析了并网光伏对系统次同步振荡特性的影响。根据相位补偿原理, 考虑发电机转速偏差信号的传输延迟, 分别设计了基于多通道结构的有功和无功型附加阻尼控制器以及混合型附加阻尼控制器; 论证了配置附加阻尼控制器并未对并网光伏的稳定出力产生影响。这种在光伏逆变器上配置附加阻尼控制器的思路可以作为抑制火电机组次同步振荡的备用方案。分析了并网光伏容量、附加阻尼控制器类型对次同步振荡抑制效果的影响, 频域和时域仿真结果表明并网光伏容量越大, 对次同步振荡的抑制效果越好; 相比单一的附加阻尼控制器, 混合型附加阻尼控制器对次同步振荡的抑制效果更好。

关键词: 光伏发电; 捆绑并网; 串联补偿; 次同步振荡; 电压源型变换器; 附加阻尼控制器

Abstract: The power output of bundled photovoltaic (PV) and thermal generators which connect power grid through series compensation AC system is a reasonable and operable scheme. Based on the modified IEEE SSR first benchmark model which integrated with grid-connected PV, complex torque coefficient method and time-domain simulation method are used to analyze the effects of PV on subsynchronous oscillation characteristics of power system. According to the transmission delay of speed deviation signal of the generator and phase compensation principle, active and reactive type additional damping controller and mixed additional damping controller are designed based on multi-channel structure. It is demonstrated that the additional damping controller does not affect the stability operation of

grid-connection PV. The idea of configuring additional damping controller in PV inverter can be used as a backup plan to suppress SSO of thermal power unit. The influence of grid-connection PV capacities and types of additional damping controller on suppressing SSO are also analyzed, frequency-domain and time-domain simulation results show that the larger grid-connected PV capacity, the better suppression effects on SSO. Compared to single additional damping control, the hybrid additional damping controller has a better suppression effects on SSO.

Keywords: photovoltaic generation; bundled connection; series compensation; subsynchronous oscillation (SSO); voltage source converter (VSC); supplementary subsynchronous damping controller

0 引 言

风电、光伏等新能源发电具有间歇性、随机性和波动性等特点, 将新能源发电与传统的火力发电组合起来经特高压交流或特高压直流送出(或称打捆外送)是一种经济可行的输电方式。在交流输电方式中, 往往使用串联补偿技术以提高线路的输送能力, 但这可能会引发送端火电机组的次同步振荡(subsynchronous oscillation, SSO), 影响电力系统的安全稳定运行^[1]。

目前抑制电力系统次同步振荡的一个重要思路就是利用 FACTS 装置的灵活控制特性, 相关装置有晶闸管控制型串联电容器^[2-4](thyristor controlled series capacitor, TCSC)、静止无功补偿器^[5-7](static var compensator, SVC)和静止同步补偿器^[8-10](static synchronous compensator, STATCOM)等。虽然在赋予了相关 FACTS 设备新的控制策略之后能够有效抑

基金项目: 电力系统国家重点实验室开放基金重点项目(SKLD 09KZ09); 中央高校基本科研业务费专项资金(12ZX06)

制 SSO, 但总体而言成本相对较高, 控制系统复杂, 增加了具体工程应用的难度。所以充分利用电力系统已有的设备, 设计相关控制策略方法来抑制电力系统的 SSO 成为了一个新的思路。

风电、光伏广泛采用了电压源型换流器(voltage sourced converter, VSC)并网, 可实现有功、无功的解耦控制, 因此可以考虑在其并网变换器中附加相应的次同步振荡阻尼控制策略, 来获得与 FACTS 装置类似的抑制效果。诚然, 新能源发电具有间歇性, 但这种新的思路仍然可以作为抑制 SSO 的一种备用方案, 同时也可以进一步提高电力系统的稳定性。

目前, 国内外对于风火打捆系统的次同步振荡问题研究较多, 如文献 [11] 用时域仿真及 Prony 辨识法分析风电接入对其近端火电机组 SSR 特性的影响, 并在无功功率环上设置附加阻尼控制器。文献 [12] 推导了双馈风电场有功功率和无功功率调节对系统阻尼系数的表达式, 并分别设计了基于有功功率或无功功率环的附加阻尼控制器。但是目前对于光伏、火电打捆送出的次同步振荡问题研究得较少。文献 [13] 验证了光伏发电与火电捆绑经高压直流输电并网时, 通过光伏并网附加控制抑制由直流输电引发的次同步振荡的可行性, 并运用复转矩系数法在交流电压外环上设计附加阻尼控制器。但该文献针对的是直流输电引发的 SSO 问题, 仅仅是在交流电压外环上附加了阻尼控制器, 而且并未研究并网光伏容量对系统 SSO 特性的影响。

本文基于 IEEE 次同步振荡第一标准模型, 在 PSCAD/EMTDC 中建立了光伏、火电打捆输送的交流系统。利用测试信号法分析了无附加阻尼控制器(subsynchronous oscillation damping controller, SSODC)时光伏并网容量对 SSO 特性的影响; 根据相位补偿原理, 分别设计了多通道有功型附加阻尼控制器(P-SSODC), 无功型附加阻尼控制器(Q-SSODC)以及混合型阻尼控制器(Hybrid-SSODC, H-SSDOC), 研究了并网光伏容量、附加阻尼控制器类型对 SSO 抑制效果的影响。最后, 通过时域仿真验证了不同光伏并网容量、不同附加阻尼控制器对火电机组 SSO 的影响。

1 系统模型

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了图 1 所示的系

统, 它由 IEEE 次同步振荡第一标准模型^[14]修改而成, 火电机组的具体参数见文献 [14]。

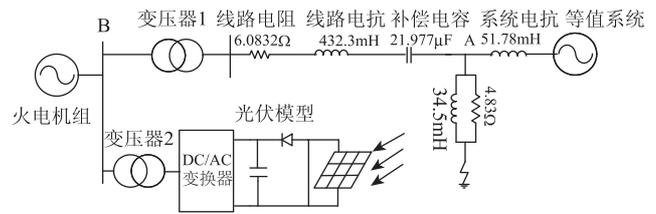


图1 光伏、火电打捆外送交流系统结构图

光伏模型由光伏阵列、MPPT控制、并网逆变器组成, 其中光伏阵列所用参数如表1所示。系统中单个光伏阵列的功率为500kW, 为了模拟多个光伏阵列, 本文采用基于受控源的聚合模型, 即在单个光伏详细模型的基础上并联理想受控电流源, 进而构成等效聚合模型^[11]。MPPT采用定步长的扰动观察法, 步长为0.001。并网逆变器采用三相两电平的VSC结构, 控制策略采用经典的有功、无功双闭环解耦控制^[15]。

表1 光伏阵列的相关参数数值

参数	数值	参数	数值
I_{sc}/A	5.55	I_m/A	5.23
U_{oc}/V	44.52	U_m/V	36.1
$S_{ref}/(kW/m^2)$	1	$T_{ref}/^{\circ}C$	25
$\alpha/^{\circ}C$	0.0025	β	0.5
$\gamma/^{\circ}C$	0.00288		
单个阵列串联光伏 电池个数/个	28	单个阵列并联光伏 电池个数/个	95
单个光伏电池 功率/kW	$5.23 \times 36.1 =$ 188.803	单个光伏阵列 功率/kW	$188.803 \times 28 \times$ $95 = 502.215$

2 SSODC 设计

2.1 SSODC 的原理

根据复转矩系数法, 电气阻尼系数 D_e 可用式(1)表示:

$$D_e = \text{Re}(\Delta \dot{T}_e / \Delta \dot{\omega}) \quad (1)$$

电磁转矩增量 $\Delta \dot{T}_e$ 和角速度增量 $\Delta \dot{\omega}$ 的相位关系如图2所示, 当 $\Delta \dot{T}_e$ 滞后于 $\Delta \dot{\omega}$ 的相位在 $90^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 之间, 即 $\Delta \dot{T}_e$ 位于第三、四象限时, D_e 为负。此时如果能在第一象限提供一个附加电磁转矩 $\Delta \dot{T}'_e$, 使得合成的电磁转矩 $\Delta \dot{T}_e'$ 能够在第一象限内, 则 D_e 数为正, 从而可以抑制 SSO。SSODC 抑

制 SSO 的思路就在于提供一个附加的电磁转矩使得合成电磁转矩 $\Delta \dot{T}'_e$ 和 $\Delta \dot{\omega}$ 的相位差小于 90° ，从而产生正阻尼抑制振荡发生。

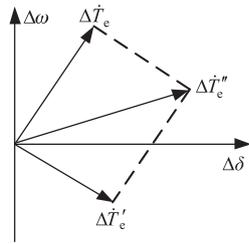


图2 电磁转矩相量关系

2.2 SSODC 的结构

SSODC 一般由测量环节、滤波环节、相位校

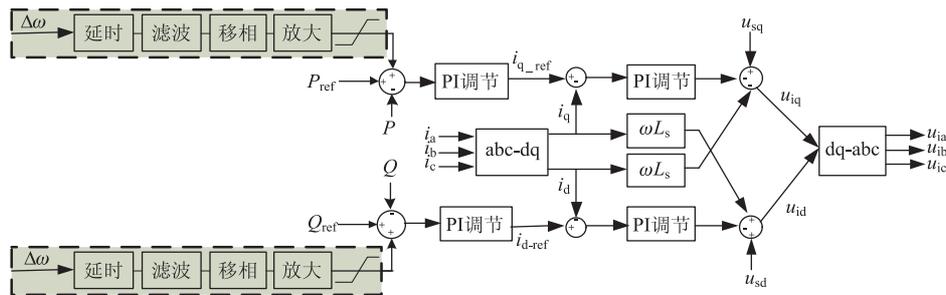


图3 抑制 SSO 的附加阻尼控制器结构图

2.2.2 滤波环节

滤波环节既可以采用多通道控制结构，又可以采用单通道控制结构，两种结构各有优缺点^[17]，本文采用的是多通道结构，其结构如图 4 所示。

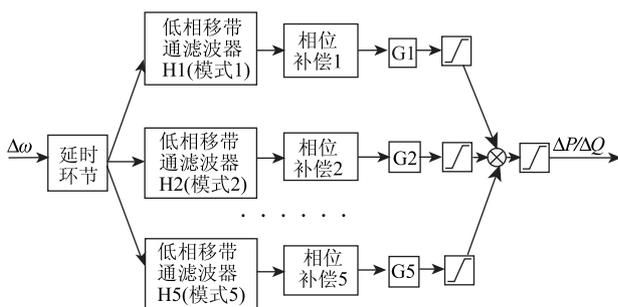


图4 多通道滤波器结构

2.2.3 相位补偿

相位补偿环节一般采用形如 $(1 + sT_1)/(1 + sT_2)$ 的超前滞后环节来进行模态频率点的滞后相位的补偿，其参数由式(2)决定：

$$a = \frac{T_2}{T_1} = \frac{1 - \sin\theta}{1 + \sin\theta}, T_1 = 1/(\omega_c \sqrt{a}), T_2 = aT_1 \quad (2)$$

正、放大环节和限幅环节构成，如图 3 所示。测量环节得到发电机的转速偏差信号，通过滤波器得到包含振荡模式的振荡分量，在经过了相位校正和放大环节之后得到了控制信号，将其叠加到光伏并网控制器的定有功或定无功参考值上，使得配置了 SSODC 的光伏逆变器能够产生阻尼转矩，从而有效抑制系统中火电机可能发生的 SSO。

2.2.1 信号测量环节

汽轮发电机的转速偏差信号包含所有振荡模态信息，可观测性很强，是较为理想的控制器输入信号，但光伏电站往往跟火电机组有一定的距离，故需要考虑传输延迟。本文延迟时间设为 100ms，采用二阶 Pade 逼近算法，具体逼近函数见文献 [16]。

式中： T_1 、 T_2 为相位补偿环节的时间常数； ω_c 为需要进行相位补偿的频率点所对应的角频率； θ 为需要进行补偿的相位角。在补偿角度较大时可以采用多个补偿环节串联进行补偿，尽量保证单个补偿环节的补偿角度小于 60° 。此外，当补偿角度的绝对值大于 90° 时，也可以采用先反相再补偿的方法。

2.2.4 放大环节与限幅环节

在一定范围内增益越大，阻尼越强，但是增益过大会引起系统的失稳^[18]，因此必须结合系统的具体特点确定最佳的增益值。另一方面附加控制的输出不能太大，否则会影响原有光伏并网控制器稳定运行，通常可设置为闭环控制限幅的 10% 左右。

3 算例分析

基于图 1 所示的系统结构，利用测试信号法和时域仿真法研究无附加阻尼控制时，并网光伏容量对系统 SSO 特性的影响；配有附加阻尼控制器时，并网光伏容量对次同步振荡抑制效果的影响以及并网光伏容量相同时，附加阻尼控制器类型

对次同步振荡抑制效果的影响。

3.1 无SSODC时并网光伏对系统次同步振荡特性的影响

3.1.1 电气阻尼分析

目前,国内并网光伏电站一般不超过100MW_p,鉴于光伏发电出力较小,年利用小时数较低,联合并网是一种主流的接入系统方案。同时考虑到光伏、火电打捆外送时光伏所占比例不宜过高,故本文的光伏容量分别设置为50MW_p、100MW_p、150MW_p。采用测试信号法^[19]对图1所示的交流系统进行阻尼扫描,结果如图5所示。

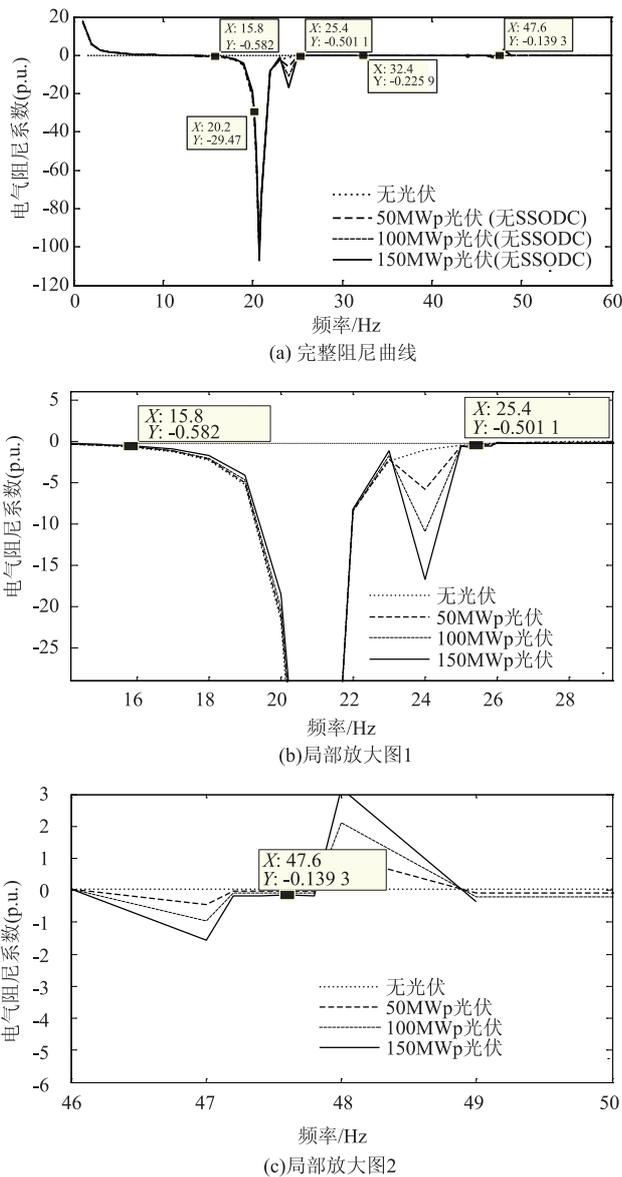


图5 无SSODC时不同并网光伏容量下的电气阻尼曲线

从图5可以看出,光伏并网会削弱某些频率

点的电气阻尼,但会增加另一些频率点的电气阻尼,这种现象随着并网光伏容量的增加而更加明显。

3.1.2 时域仿真

为进一步验证阻尼扫描的有效性,基于图1的测试系统,在A点处施加三相短路故障,故障时刻为5s,故障持续时间为0.075s,观察比较各工况下火电机组轴系各质量块之间的扭矩以及各模式转速偏差的变化曲线,图6~9依次为无SSODC情况下,并网光伏容量为0、50、100、150MW_p时火电机组的时域仿真图。图中 T_{HP-IP} 表示高压缸和中压缸之间的扭矩, T_{IP-LPA} 表示中压缸和低压缸A之间的扭矩, $T_{LPA-LPB}$ 表示低压缸A、B之间的扭矩, $T_{LPB-GEN}$ 表示低压缸B和发电机之间的扭矩, $T_{GEN-EXC}$ 表示发电机和励磁机之间的扭矩。上述各扭矩均为标么值;图中的 $d\omega_i (i=1, \dots, 5)$ 表示模式转速偏差,单位为rad/s。

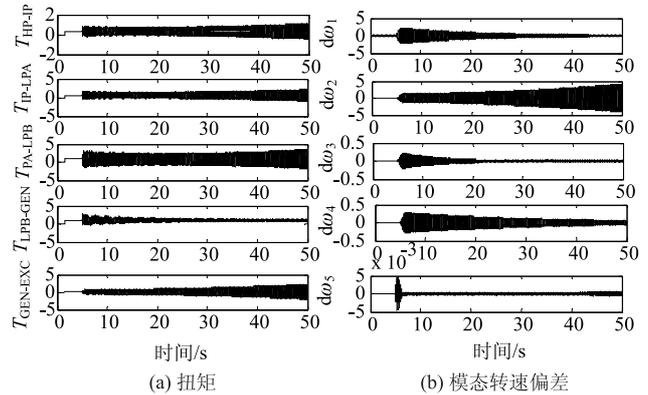


图6 无光伏并网时火电机组的时域仿真图

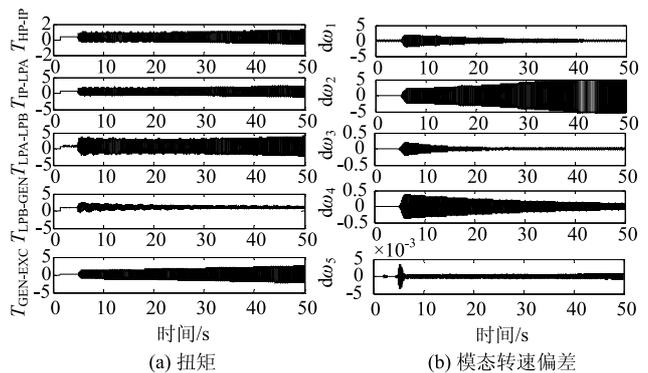


图7 50MW_p光伏并网时火电机组的时域仿真图

从图中可以看出随着并网光伏容量的增加, T_{HP-IP} 、 T_{IP-LPA} 、 $T_{LPA-LPB}$ 、 $T_{GEN-EXC}$ 由振荡发散变为等幅振荡, $T_{LPB-GEN}$ 收敛变慢; $d\omega_1$ 收敛变快, $d\omega_2$

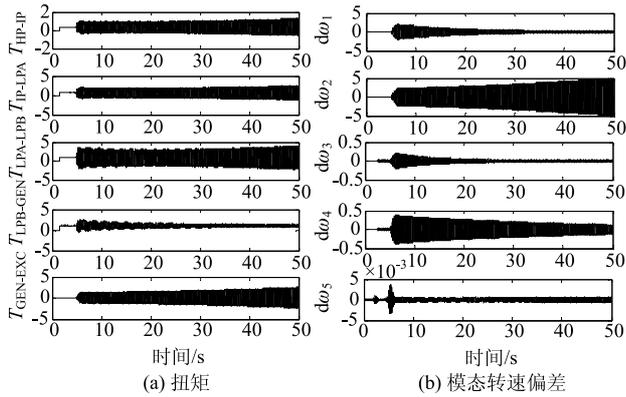


图 8 100MWp 光伏并网时火电机组的时域仿真图

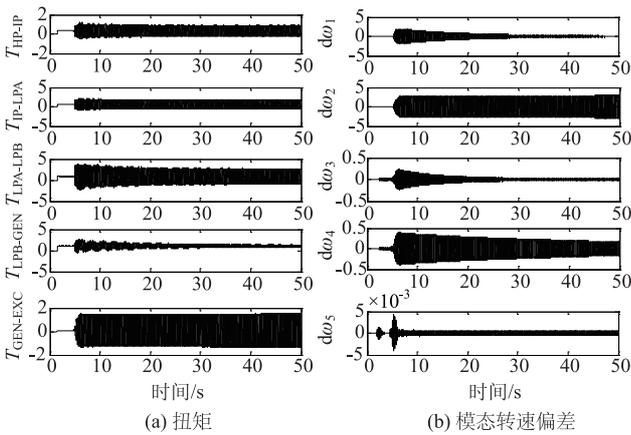


图 9 150MWp 光伏并网时火电机组的时域仿真图

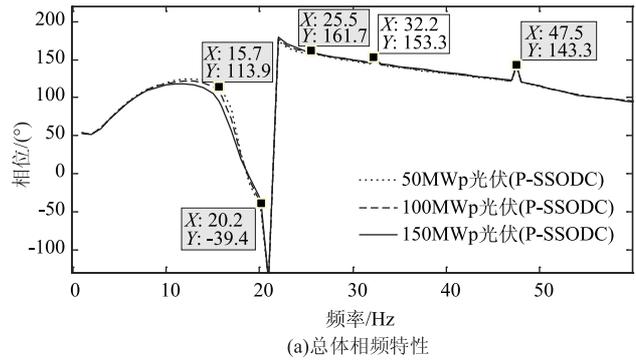
由快速发散变为近似等幅振荡， $d\omega_3$ 、 $d\omega_4$ 、 $d\omega_5$ 收敛变慢，时域仿真结果与电气阻尼分析结论一致。

3.2 配置 P-SSODC 时并网光伏容量对 SSO 抑制效果的影响

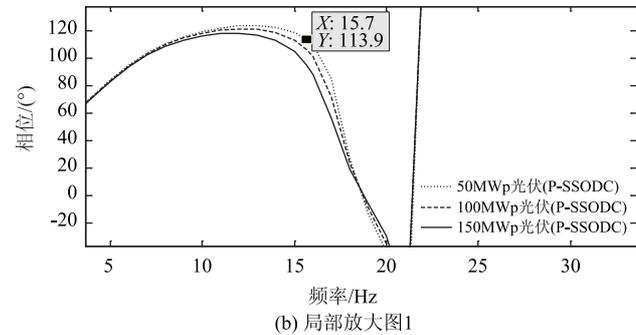
3.2.1 P-SSODC 的具体设计

根据测试信号法，考虑信号传输延时，在光伏并网逆变器侧的有功外环上施加次同步频率的小幅扰动，分别对 3 种并网光伏容量下 P-SSODC 及一次系统引起的相位偏移进行扫描，相频特性如图 10 所示。

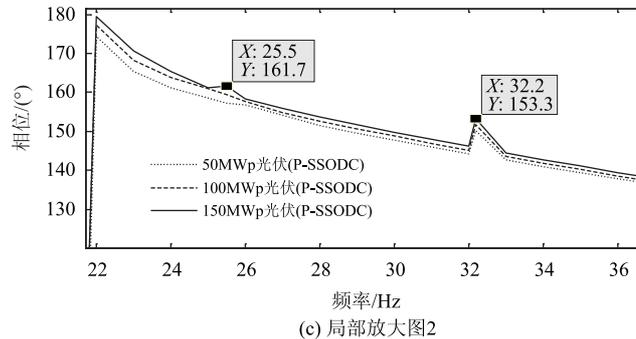
可以看出随着光伏并网容量的改变，相频特性也会有一些改变。考虑火电机组自然扭振频率的估算值和真实值之间往往会有一定的误差，故使用低相移的带通滤波器进行模态滤波，相关参数见文献 [20]。采用前文所述的超前滞后环节对各个扭振模态进行相位补偿，对于各模态放大环节系数，则通过多次时域仿真予以确定。由于篇幅有限，这里仅通过表 2 给出光伏并网容量为



(a) 总体相频特性



(b) 局部放大图 1



(c) 局部放大图 2

图 10 不同并网光伏容量下 P-SSODC 的相频特性曲线

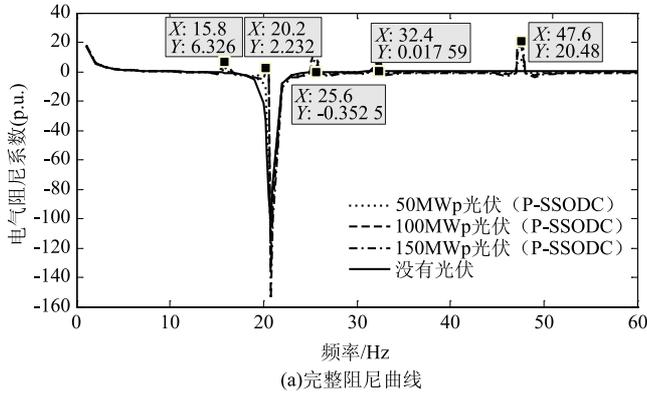
150MWp 时各个扭振模态所对应的相位补偿环节、放大环节和限幅环节的相关参数。

表 2 150MWp 光伏并网时 P-SSODC 的相位校正和放大环节参数

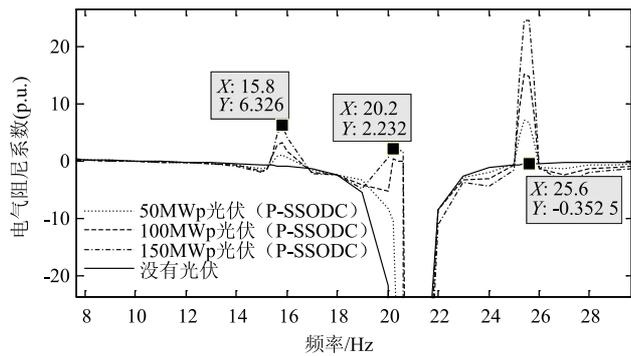
各模态中心频率/Hz	传递函数	是否采用先反相再补偿	放大环节系数	限幅
15.71	$\left(\frac{1+0.022\ 92s}{1+0.004\ 48s}\right)^2$	是	0.003	± 0.02
20.21	$\left(\frac{1+0.011\ 19s}{1+0.005\ 55s}\right)^2$	否	0.001	± 0.05
25.55	$\frac{1+0.008\ 64s}{1+0.004\ 51s}$	是	0.004	± 0.02
32.28	$\frac{1+0.008\ 02s}{1+0.003\ 05s}$	是	0.001	± 0.02
47.45	$\left(\frac{1+0.004\ 64s}{1+0.002\ 42s}\right)^2$	是	0.001	± 0.02
总限幅				± 0.1

3.2.2 电气阻尼分析

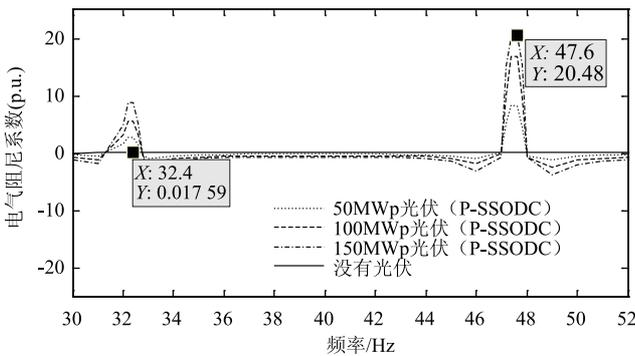
采用测试信号对配置了 P-SSODC 的光伏、火电打捆系统进行阻尼扫描，不同并网光伏容量下的电气阻尼结果如图 11 所示。



(a)完整阻尼曲线



(b)局部放大图1



(c)局部放大图2

图 11 配有 P-SSODC 时不同并网光伏容量下的电气阻尼特性曲线

从图中可以看出，配有 P-SSODC 后，每个扭振频率附近的电气阻尼都有了一定的改善，而且随着并网光伏容量的增加，阻尼改善效果也随之增加。但与扭振频率相距 1Hz 左右的频率点的电气阻尼却有所下降，这正是多通道分模态结构的缺点之一^[18]。

3.2.3 时域仿真

设置与前文相同的故障，分析配有 P-SSODC 时并网光伏容量对次同步振荡抑制效果的影响，图 12~14 依次为配置了 P-SSODC 后并网光伏容量为 50、100、150MW_p 时火电机组的时域仿真图。

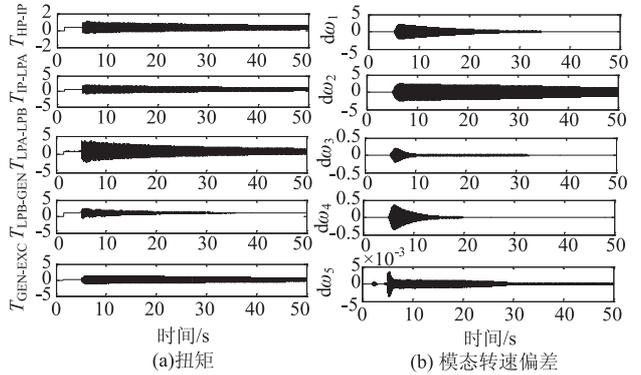


图 12 50MW_p 光伏并网时火电机组的时域仿真图 (配有 P-SSODC)

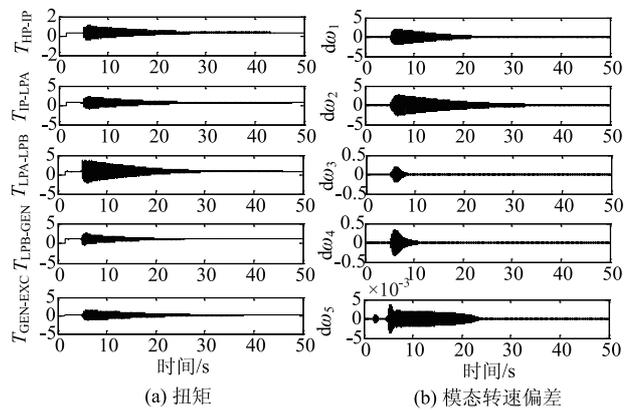


图 13 100MW_p 光伏并网时火电机组的时域仿真图 (配有 P-SSODC)

从图中可以看出，配有 P-SSODC 之后，随着并网光伏容量的增加，扭矩和模态转速偏差收敛速度加快，对 SSO 的抑制效果也逐渐变好，这与前文中的阻尼分析结果一致。此外需要注意的是，当并网光伏容量为 50MW_p 时，时域仿真中 $d\omega_2$ 是收敛的，但图 11 中的电气阻尼曲线在第二个扭振频率点处是一个负值，这是因为当并网光伏容量为 50MW_p 且配置 P-SSODC 时，光伏的接入提升了火电机组在第二个扭振频率点的电气阻尼，虽然提升后的电气阻尼仍是负值，但由于机械阻尼总为正值，从而该模态对应的总阻尼为正，故时域仿真仍是收敛的。

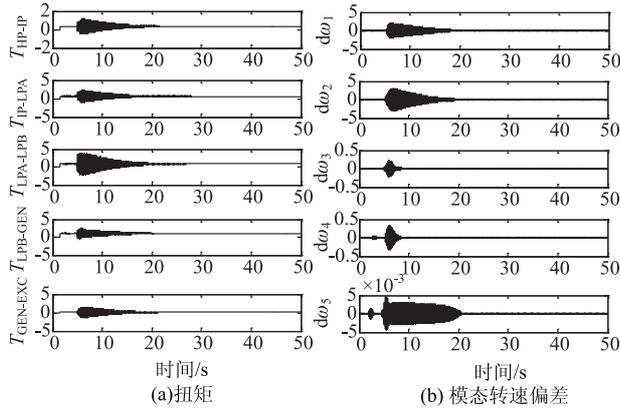


图 14 150MW_p 光伏并网时火电机组的时域仿真图 (配有 P-SSODC)

为了验证配有 SSODC 后是否会对光伏自身的稳定出力造成影响, 图 15 也给出了并网光伏容量为 150MW_p 时光伏的出力曲线。从图中可以看出, 故障后短时间内并网光伏的有功、无功输出有小范围的波动, 但能较快地平稳下来。由于电力系统在正常运行未发生 SSO 时, SSODC 是不启动的, 故可以认为配置 SSODC 并不会影响光伏自身的稳定出力。

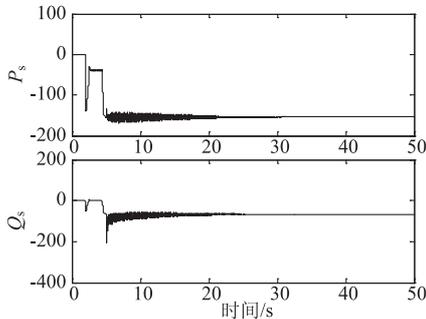


图 15 配置了 P-SSODC 时光伏出力曲线

3.3 光伏并网容量相同时附加阻尼控制类型对次同步振荡抑制效果的影响

由于光伏并网逆变器采用 VSC 结构, 可实现有功、无功的解耦控制, 故不仅可以在有功外环上配置 SSODC, 也可以无功外环上配置 SSODC, 或者同时有功外环、无功外环上配置 SSODC 构成混合型 SSODC。下面以并网光伏容量为 150MW_p 的情况为例, 分析 SSODC 类型对 SSO 抑制效果的影响。

3.3.1 Q-SSODC 和 H-SSODC 的设计

设计 Q-SSODC 的方法与 P-SSODC 一致, 图 16 是 Q-SSODC 的相频特性, 表 3 直接给出

Q-SSODC 的相位校正环节和放大环节的相关参数。

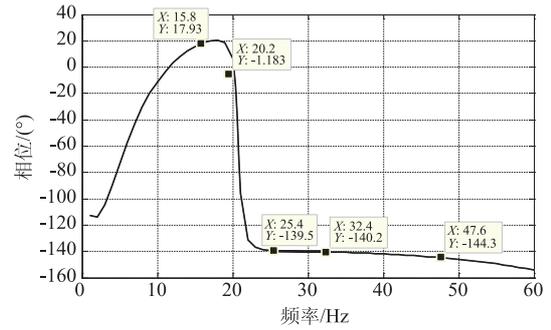


图 16 Q-SSODC 的相频特性

表 3 150MW_p 并网时 Q-SSODC 的相位校正和放大环节参数

各模式中心频率/Hz	传递函数	是否采用先反相再补偿	放大环节系数	限幅
15.71	$\frac{1+0.00741s}{1+0.0139s}$	否	0.03	± 0.02
20.21	$\frac{1+0.00804s}{1+0.00772s}$	否	0.0033	± 0.05
25.55	$\left(\frac{1+0.000435s}{1+0.00896s}\right)^2$	是	0.05	± 0.02
32.28	$\left(\frac{1+0.00347s}{1+0.00705s}\right)^2$	是	0.05	± 0.02
47.45	$\left(\frac{1+0.00244s}{1+0.00460s}\right)^2$	是	0.05	± 0.02
总限幅			± 0.1	

对于 H-SSODC, 其所包含的有功环 SSODC 和无功环 SSODC 的参数与单独的 P-SSODC、Q-SSODC 参数是一致的, 不再赘述。

3.3.2 电气阻尼分析

根据仿真结果得到在 150MW_p 并网光伏容量下配有不同 SSODC 时的电气阻尼特性曲线, 如图 17 所示。

从图中可以看出, 与单独配有 P-SSODC 或 Q-SSODC 相比, 配有 H-SSODC 时光伏提升火电机组扭振频率附近的电气阻尼的效果更加显著。

3.3.3 时域仿真

设置与前文相同的故障, 分析并网光伏容量为 150MW_p 时, 配有不同类型 SSODC 对火电机组 SSO 抑制效果的影响, 图 18~19 分别为配置 Q-SSODC 和 H-SSODC 时火电机组的时域仿真图。

综合比较图 14、图 18 和图 19 可以看出配有 H-SSODC 时轴系各质量块之间扭矩和模式转速偏差的收敛速度要明显比仅配有 P-SSODC 或 Q-SSODC 时要快, 即配有 H-SSODC 时光伏逆变

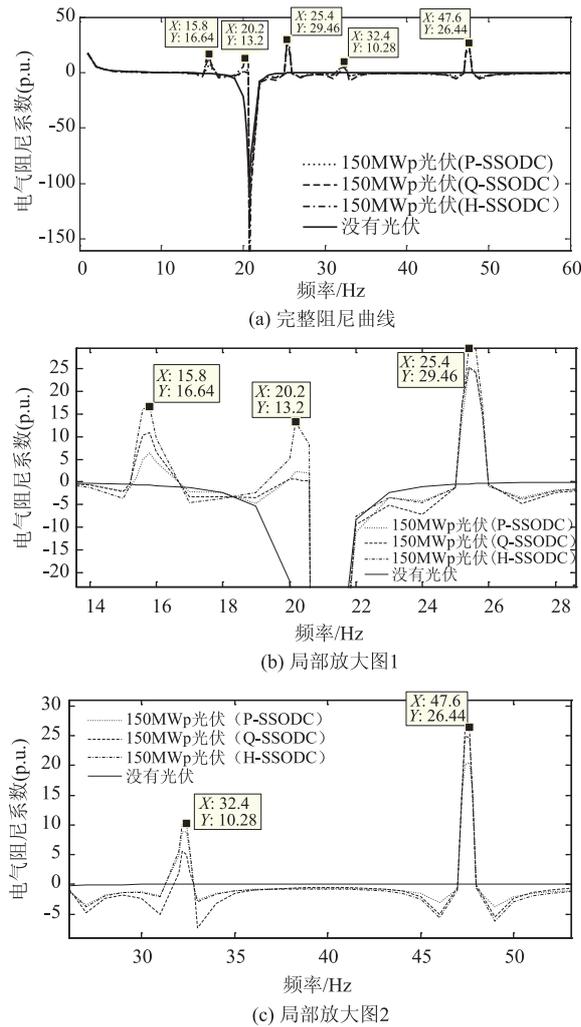


图 17 配有不同类型 SSODC 时的电气阻尼特性曲线

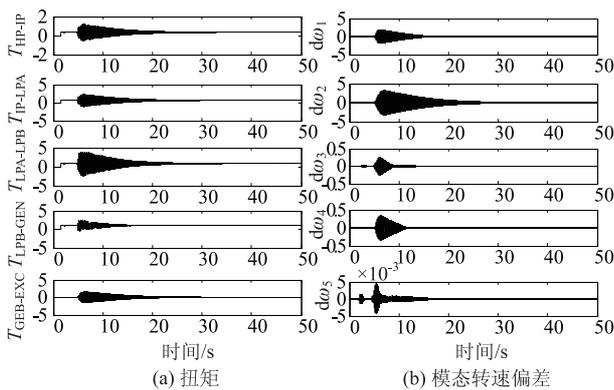


图 18 150MWp 光伏并网时火电机组的时域仿真图(配有 Q-SSODC)

器对 SSO 的抑制效果要好于仅配有 P-SSODC 和 Q-SSODC 的情况, 这与上面电气阻尼分析的结论一致。

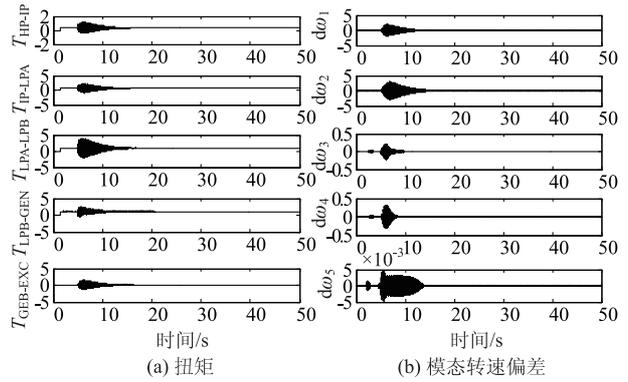


图 19 150MWp 光伏并网时火电机组的时域仿真图(配有 H-SSODC)

4 结论

本文分析了光伏发电与火力发电捆绑经交流系统送出时, 光伏对系统次同步振荡特性的影响。结果表明光伏并网会削弱某些频率点的电气阻尼, 同时会增加某些频率点的电气阻尼, 这种现象会随着并网光伏容量的增加而更加明显。

为提高光伏、火电打捆系统的电气阻尼, 在光伏逆变器上配置 SSODC, 给出了 SSODC 的详细设计方法。电气阻尼分析和时域仿真结果表明, 仅配置 P-SSODC 时并网光伏容量越大越能改善火电机组的电气阻尼, 增强 SSO 的抑制效果; 同时, 配置 SSODC 也不会对光伏自身的稳定出力产生影响。在并网光伏容量相同的情况下, 与仅配置 P-SSODC、Q-SSODC 相比, 配置 H-SSODC 时并网逆变器对 SSO 的抑制效果更好。

虽然本文并未考虑光伏发电间歇性和波动性的特点, 但这种在光伏逆变器上附加阻尼控制器的新思路仍然可以作为抑制火电机组 SSO 的一种备用方案。

参考文献

[1] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
 [2] 葛俊, 童陆园, 耿俊成, 等. TCSC 抑制次同步谐振的机理研究及其参数设计 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 26-30.
 [3] 韩光, 童陆园, 葛俊, 等. TCSC 抑制次同步谐振的机理分析 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 18-21, 44.
 [4] 周长春, 刘前进, Angquist L, 等. 抑制次同步谐振

- 的 TCSC 主动阻尼控制 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 130-135.
- [5] 谢小荣, 杨庭志, 姜齐荣, 等. 采用 SVC 抑制次同步谐振的机理分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 1-5.
- [6] 董飞飞, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于改进生物地理学优化算法的 SVC 次同步阻尼控制器设计 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 56-60.
- [7] 谢小荣, 武云生, 林惊涛, 等. 采用遗传一模拟退火算法优化设计 SVC 次同步阻尼控制器 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 11-14.
- [8] 肖湘宁, 张剑, 高本锋, 等. 多电厂频繁低幅次同步振荡的现象模拟及抑制措施研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(8): 930-942.
- [9] 李志鹏, 谢小荣. 应用静止同步补偿器抑制次同步谐振的模态互补电流控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 22-27.
- [10] Padiyar K, Prabhu N. Design and performance evaluation of subsynchronous damping controller with STATCOM [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1398-1405.
- [11] 雷虹云, 郑超, 岳兴华, 等. 风火电组合外送系统中风电改善火电机组 SSR 的研究 [J]. 中国电力, 2013, 46(4): 63-68.
- [12] 李辉, 陈耀君, 赵斌, 等. 双馈风电场抑制系统次同步振荡分析及控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1613-1620.
- [13] 李宽, 李兴源, 陈实, 等. 光伏并网抑制由直流输电引起的次同步振荡的可行性分析 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 41-46.
- [14] Group I S W. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [15] 张兴. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [16] 陈甜妹. 混合可控串补抑制次同步振荡的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [17] 高本锋, 赵成勇, 肖湘宁, 等. 高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制器的设计与实现 [J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 501-506.
- [18] 肖湘宁. 电力系统次同步振荡及其抑制方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [19] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 2-5.
- [20] 张静, 徐政, 郑翔, 等. SVC 抑制 SSR 的机理及控制器设计 [J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 57-61.
-
- 收稿日期:** 2015-08-16
- 作者简介:**
陈钦磊(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统次同步振荡, E-mail: hncql.ok@163.com;
郭春林(1975-), 男, 副教授, 研究方向为 FACTS 分析与控制、电动汽车充电基础设施、电能质量控制, E-mail: gcl@ncepu.edu.cn.
- (责任编辑: 杨秋霞)