

统一潮流控制器对电力系统次同步振荡的协调抑制策略

蔡 晖¹, 王海潜¹, 季杭为², 高 山², 李 颖³, 赵 欣², 陆 军²

(1. 江苏省电力公司电力经济技术研究院, 江苏 南京 210000;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

3. 国网徐州供电公司, 江苏 徐州 221000)

摘 要: 次同步振荡是一种非常严重的电网稳定性问题, UPFC 作为目前功能最为强大的 FACTS 装置, 能够有效抑制系统振荡。本文提出了一种 UPFC 串并联侧同时附加阻尼协调抑制 SSO 的策略。首先基于复转矩系数法, 推导了含 UPFC 电力系统的电气阻尼表达式, 分析了 UPFC 抑制次同步振荡的原理。然后以串并联侧共同附加电气复转矩系数相位最优为目标, 将 UPFC 参数设计转化成一个优化问题, 并利用遗传算法求解。最后算例分析表明, 本文所提出的 UPFC 串并联侧协调抑制策略能有效抑制次同步振荡, 保障系统的安全稳定运行。

关键词: UPFC; 次同步振荡; 复转矩系数法; 电气阻尼; 协调控制

0 引言

近年来, 随着串联补偿和柔性交流输电技术(FACTS)的应用, 原本不可控的电力系统变得灵活起来, 这些装置在控制系统运行状态、改善运行特性、提高线路输电能力的同时, 也给电力系统的稳定运行带来了新的难题。其中, 次同步振荡(SSO)就是需要迫切解决的问题之一^[1]。次同步振荡作为一种典型的振荡失稳现象, 严重时会导致发电机转子轴系的破坏。为有效抑制SSO, 可利用FACTS增加振荡模态的阻尼。这种方法不需要增加电力系统的一次设备, 具有良好的经济性, 受到了学术界的普遍关注。

传统FACTS装置按照其在线路中的安装类型可以分为并联型和串联型, 对于并联型的FACTS装置, 多通过附加谐振频附近电气阻尼控制来抑制电力系统次同步振荡^[2,3]。对于串联型的FACTS装置, 一般通过调节自身次频阻抗以改变系统次频阻抗特性来避开谐振点^[4,5]。基于变换器的FACTS装置中, 统一潮流控制器(UPFC)是功能最为强大的, 其可以同时控制本地母线电压和输电线的潮流, 使电力系统处于最优工作状态^[6]。UPFC属于背靠背型的电力电子器件, 并联侧结构与STATCOM相同, 串联侧结构与SSSC相同, 将其用于抑制电力系统低频振荡的研究较多, 文献[7]提出相应改变UPFC的控制方式, 采用分段控制策

略, 可大幅度地改善系统在低频的稳定性。文献[8]通过线性最优控制理论设计出UPFC的最优控制器, 对系统的低频振荡有良好的抑制作用。文献[9]针对单个低频振荡模态设计了UPFC的稳定控制器, 并利用最大转矩面积原理优化了控制器的参数, 提高了系统阻尼水平。关于次同步振荡问题, 文献[10]建立了考虑换流器开关管动作过程的UPFC的暂态数学模型, 根据复转矩系数法提出了基于UPFC串联侧的次同步谐振抑制策略。文献[11]通过改变UPFC的控制策略, 并在风机桨距角控制中附加阻尼控制, 通过提高次同步频段电气阻尼的方式抑制次同步振荡。总体来说, 上述抑制策略没有充分利用到UPFC并联侧和串联侧背靠背型结构的优点, 因此, 设计出协调UPFC串并联侧的控制来抑制电力系统次同步振荡的策略显得尤为关键, 并且具有重要的意义。

本文将 UPFC 接入 IEEE 第二标准测试系统, 协调 UPFC 串联侧和并联侧阻尼电力系统次同步振荡的控制器。先采用复转矩系数分析法, 推导出系统电气复转矩系数表达式。在此基础上, 以系统电气阻尼最优为目标, 将 UPFC 控制器的设计转化成一个优化问题并采用遗传算法求解, 以同时发挥 UPFC 串联侧和并联侧的抑制能力。最后通过系统阻尼分析和时域仿真, 证明了本文所提出阻尼控制器具有良好的抑制次同步振荡能力。

1 系统模型

1.1 测试系统介绍

本文采用 IEEE 推荐的用于 SSO 研究的第二标准模型中的系统一作为研究对象, 该系统由一个可以用来比较自励磁和扭矩放大现象的汽轮发电机、升压变压器、两条输电线路向和无穷大系统构成, 其中一条输电线路采用了串联补偿技术以提高线路输电能力。本文将 UPFC 接入系统具有串联补偿电容线路的首端, 以达到稳定母线电压和控制线路潮流的目的。其输电网络及系统构成如图 1 所示。

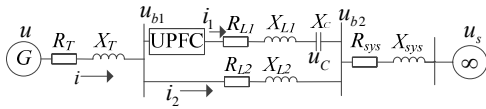


图 1 含有 UPFC 的 IEEE 第二标准测试系统

1.2 UPFC 的结构和原理

当电网中含基于换流器开关器件的复杂 FACTS 装置时, 建立其精确的动态模型是一个难题, 并且会给理论分析计算带来很大的困难, 严重阻碍了对电力系统动态问题的研究。本文将 UPFC 的并联部分 STATCOM 等效成为一个理想电流源来研究, 而将 UPFC 的串联部分 SSSC 等效成为一个理想电压源来研究。同时在动态过程中, 考虑 UPFC 并联侧和串联侧的功率交换以及直流侧的充放电过程, 因此, 在 UPFC 的等效模型中包括如下表达式

$$\text{Re}[\dot{V}_E \dot{I}_E^* - \dot{V}_P \dot{I}_P^*] = u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} C_{dc} \quad (1)$$

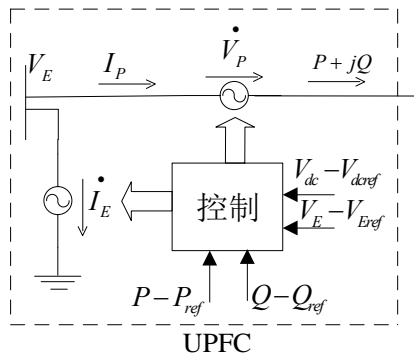
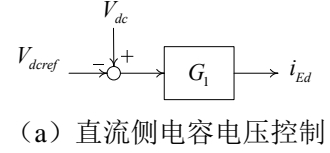


图 2 UPFC 的等效模型

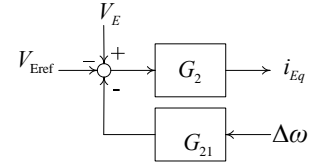
如图 2 所示的 UPFC 的等效模型, 并联侧控制对象为直流侧电容电压 V_{dc} 和并联侧节点电压 V_E , 使用 PI 控制器, 输出为并联侧注入电流 I_E 的 d 轴分量 i_{Ed} 和 q 轴分量 i_{Eq} 。串联侧控制对象为线路的有功

功率 P 和线路的无功功率 Q , 使用 PI 控制器, 输出为串联侧注入电压 V_p 的 d 轴分量 u_{pd} 和 q 轴分量 u_{pq} 。

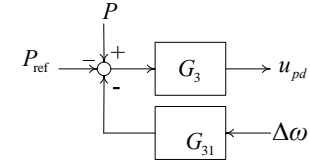
将控制关系用传递函数表示, 得到如图 3 所示的 UPFC 的控制框图。



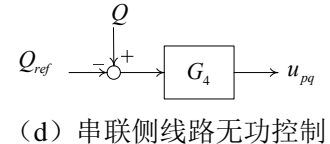
(a) 直流侧电容电压控制



(b) 并联侧节点电压控制



(c) 串联侧线路有功控制



(d) 串联侧线路无功控制

图 3 UPFC 的控制框图

其中, V_{dcref} 、 V_{Eref} 、 P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为直流侧电容电压、并联侧节点电压、串联侧线路有功功率和串联侧线路无功功率的参考值, V_{dc} 、 V_E 、 P 和 Q 分别为直流侧电容电压、并联侧节点电压、串联侧线路有功功率和串联侧线路无功功率的实际值, G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 分别为相应控制回路中主控制的传递函数, $\Delta\omega$ 为发电机转速偏移信号, G_{21} 和 G_{31} 为 UPFC 并联侧和串联侧附加控制的传递函数。由此可以得到如下控制表达式

$$i_{Ed} = G_1(V_{dc} - V_{dcref}) \quad (2)$$

$$i_{Eq} = G_2[V_E - (G_{21}\Delta\omega + V_{Eref})] \quad (3)$$

$$u_{pd} = G_3[P - (G_{31}\Delta\omega + P_{ref})] \quad (4)$$

$$u_{pq} = G_4(Q - Q_{ref}) \quad (5)$$

式 (1) ~ (5) 五个方程就构成了 UPFC 的等效模型, 采用复转矩系数法分析系统时, 该模型容易与电网接口, 并且得到比较高的计算精度。

2 UPFC 抑制次同步振荡的策略

2.1 电气复转矩系数推导

在上一节中, 已经得到 UPFC 的等效模型式 (1) ~ (5), 对于图 3 所示系统, 其 dq 坐标下的线性化方程为

$$\begin{bmatrix} u_{b1d0} & u_{b1q0} \end{bmatrix} \Delta i_{Edq} + \begin{bmatrix} i_{Ed0} & i_{Eq0} \end{bmatrix} \Delta u_{b1dq} - \left\{ \begin{bmatrix} u_{pd0} & u_{pq0} \end{bmatrix} \Delta i_{1dq} + \begin{bmatrix} i_{1d0} & i_{1q0} \end{bmatrix} \Delta u_{pdq} \right\} = 2CpV_{dc0} \Delta V_{dc} \quad (6)$$

$$\Delta i_{Edq} = \begin{bmatrix} G_1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta V_{dc} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{G_2 u_{b1d0}}{\sqrt{u_{b1d0}^2 + u_{b1q0}^2}} & \frac{G_2 u_{b1q0}}{\sqrt{u_{b1d0}^2 + u_{b1q0}^2}} \end{bmatrix} \Delta u_{b1dq} - \begin{bmatrix} 0 \\ G_1 G_{21} \end{bmatrix} \Delta \omega \quad (7)$$

$$\Delta u_{pdq} = \begin{bmatrix} G_3 u_{b2d0} & G_3 u_{b2q0} \\ G_4 u_{b2d0} & -G_4 u_{b2q0} \end{bmatrix} \Delta i_{1dq} + \begin{bmatrix} G_3 i_{1d0} & G_3 i_{1q0} \\ -G_4 i_{1d0} & G_4 i_{1q0} \end{bmatrix} \Delta u_{b2dq} - \begin{bmatrix} G_3 G_{31} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta \omega \quad (8)$$

最后, 将 $p=j\xi$ 代入, 得到该系统电气复转矩系数的表达式为

$$K_E(j\xi) = K_E(\xi) + j\xi D_E(\xi) \quad (9)$$

其中, $D_E(\xi)$ 就是所要求的电气阻尼系数。如果令 UPFC 附加阻尼控制器的传递函数 G_{21} 和 G_{31} 都为零, 就可以根据式 (18) 得到系统 UPFC 无附加阻尼控制时的电气复转矩系数 $K_{E0}(j\xi)$, 此时系统因附加阻尼控制而增加的电气复转矩系数的表达式可以写成

$$\Delta K_E(j\xi) = K_E(j\xi) - K_{E0}(j\xi) \quad (10)$$

2.2 抑制原理

电磁转矩 ΔT_e 与转速偏差 $\Delta \omega$ 的相量图可用图 4 表示。若电气阻尼转矩为负, 且电气阻尼与机械阻尼之和小于零, 系统就会不稳定。从图中可以看出, 当电磁转矩 ΔT_e 超前于 $\Delta \delta$ 的相位在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间, 即 ΔT_e 位于第三或第四象限时, 电气阻尼转矩 ΔT_D 为负, 可能导致系统不稳定。若可以另外提供一个位于第一象限的电磁转矩 $\Delta T_e'$, 使得 ΔT_e 与

$\Delta T_e'$ 的相量和在第一象限, 则此时电气阻尼转矩为正, 有利于次同步振荡的抑制。

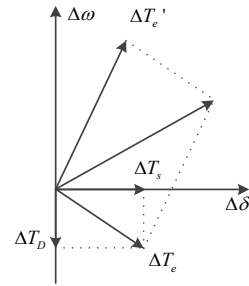


图 4 电磁转矩与转速偏差信号相量图

因此, 为保证附加阻尼控制器能提供正的阻尼转矩, 应尽可能使得 $\Delta T_e'$ 的相位滞后 $\Delta \delta$ 的相位 90° 。系统电磁转矩 ΔT_e 和 $\Delta T_e'$ 与 $\Delta \delta$ 的关系可以通过电气复转矩系数表示, 即有

$$\begin{cases} \Delta T_e = K_{E0}(j\xi) \bullet \Delta \delta \\ \Delta T_e' = \Delta K_E(j\xi) \bullet \Delta \delta \end{cases} \quad (11)$$

综上, 只要使得 $\Delta K_E(j\xi)$ 的相位在发电机轴系固有扭振频处为 90° , 就可以有效的抑制次同步振荡。

2.3 UPFC 阻尼控制器的设计

为了使系统在轴系的所有扭振模态频率处都有正阻尼, 需要协调 UPFC 串并联侧的阻尼控制器, UPFC 并联侧和串联侧附加的阻尼控制器的结构都如图 5 所示。

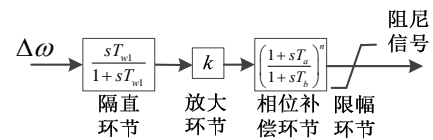


图 5 附加阻尼控制器的结构

其中, 因为隔直环节对系统电气阻尼的影响很小, 因此可以对其参数不进行优化。这时, 串联侧和并联侧的附加阻尼控制器分别还有放大环节和相位补偿环节的 3 个参数即一共 6 个参数 k_1 、 T_{a1} 、 T_{b1} 、 k_2 、 T_{a2} 和 T_{b2} , 其中 T_{a1} 、 T_{b1} 、 T_{a2} 和 T_{b2} 分别由并联侧和串联侧附加阻尼控制器的相位补偿点频率和补偿角度计算出来的, 所以实际过程中, 可以优化控制器的放大倍数 k_1 和 k_2 、两个附加阻尼控制器的相位补偿点频率 ω_{x1} 和 ω_{x2} 以及相应的补偿角度 φ_1 和 φ_2 这 6 个参数构成的 6 维矢量 x , 此即遗传算

法中的个体矢量。给出遗传算法的目标函数：

$$\begin{cases} \min J = \sum [angle[\Delta K_E(j\omega_i)] - 90^\circ]^2 \\ 1 \leq |k_1|, |k_2| \leq 10 \\ 5 \leq \omega_{x1}, \omega_{x2} \leq 55 \\ -89^\circ \leq \varphi_1, \varphi_2 \leq 89^\circ \end{cases} \quad (12)$$

式中, ω_i 为系统汽轮发电机轴系的固有扭振频率, $angle[\Delta K_E(j\omega_i)]$ 为轴系扭振模态频率 ω_i 处因附加阻尼控制器而增加的电气复转矩系数 $\Delta K_E(j\omega_i)$ 的相位。系统目标函数是在轴系所有扭振频处 $\Delta K_E(j\omega_i)$ 的相位与 90° 差的平方和取得最小值, 各参数的取值范围如上式所示。

3 算例分析

图 3 所示系统的参数由表 1 给出, 所有参数均为标么值, 其基值为 100MVA 和 500kV。文献[12]计算了 IEEE 第二标准模型在次同步频段的固有扭振模态分别为 24.65Hz、32.39 Hz 和 51.10 Hz。

表 1 系统电网元件参数

参数	正序	零序
$R_T + jX_T$	0.0002 + j0.0200	0.0002 + j0.0200
$R_{L1} + jX_{L1}$	0.0074 + j0.0800	0.0220 + j0.2400
$R_{L2} + jX_{L2}$	0.0067 + j0.0739	0.0186 + j0.2100
$R_{sys} + jX_{sys}$	0.0014 + j0.0300	0.0014 + j0.0300
$R_a + jX_a$	0.0045 + j0.1200	...

对于遗传算法, 设定群体大小为 50, 终止进化代数为 100, 交叉概率为 0.5, 变异概率为 0.0005, 随机产生初始种群, 当进化个体满足要求或进化超过代数, 停止计算, 否则继续。当程序运行到 20 代时, 适应度函数小于了预先设定的最小值, 计算停止, 得到 UPFC 串并联侧协同抑制次同步振荡的各参数见表 2。

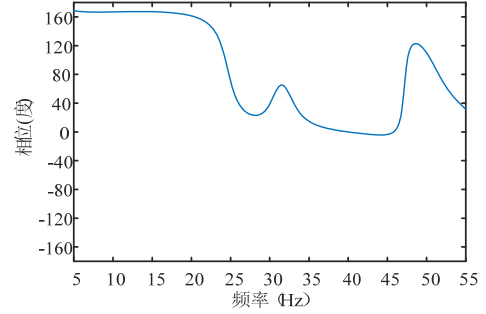
表 2 遗传算法优化结果

参数	k_1	ω_{x1}	φ_1	k_2	ω_{x2}	φ_2
最优值	5.7	22	-79.	8.4	51	-5.4

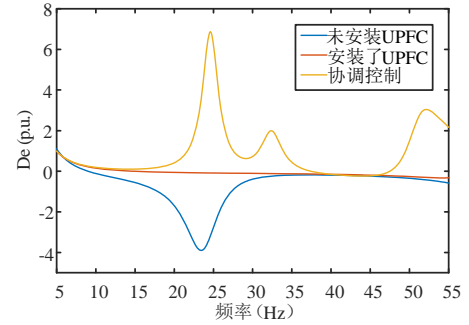
3.1 系统阻尼分析

利用表 2 的控制器参数的优化结果, 计算此时 UPFC 附加阻尼控制器使系统增加的电气复转矩系数 $\Delta K_E(j\xi)$, 并且画出其相位频率特性曲线如图 6 (a) 所示, 从图中可以看到, 在系统汽轮发电机轴系的三个扭振模态频率点 24.65Hz、32.4Hz 和 51.1Hz 处, 相位分别为 88.48° 、 54.53° 和 89.48° , 都接近于 90° , 附加阻尼控制器可以有效提高全部

汽轮发电机轴系扭振模态频率处的电气阻尼, 使得抑制次同步振荡的能力大大增强, 而且在其他次同步频段上, $\Delta K_E(j\xi)$ 的相位也维持在 $0 \sim 180^\circ$ 之间, 从而能保证不会给系统提供负阻尼, 具有了极其理想的效果。



(a) $\Delta K_E(j\xi)$ 的相频特性



(b) 系统电气阻尼变化

图 6 UPFC 串并联侧协调抑制次同步振荡

根据系统电气阻尼的计算公式 (18), 计算此时全系统的电气阻尼如图 6 (b) 所示, 从图中可以看到, 同时协调控制串并联侧的控制器可以提高汽轮发电机全部扭振模态处的正阻尼, 无论系统运行条件变化或者谐振点发生偏移, UPFC 都能够有效抑制次同步振荡, 大大提高了电力系统的稳定性。

3.2 仿真实验

在 MATLAB/SIMULINK 仿真平台上, 前搭建含 UPFC 的 IEEE 第二标准模型, 在此基础上, 根据本文设计好的附加阻尼控制器, 分别搭建 UPFC 针对并联侧和串联侧的附加阻尼控制器。将仿真时长设置为 5s, 仿真到 1s 时, 在发电机出口处加入三相接地短路扰动, 短路持续时间为一个工频周期。然后分如下三种情况来分析研究发电机转子的转速偏差的振荡特性:

情况1: IEEE 推荐的用于次同步振荡研究

的第二标准模型,串补度为55%;

情况2: 在标准模型的第一条输电线路中加入UPFC,此时UPFC控制回路中不含附加阻尼控制器;

情况3: 在含UPFC的标准模型中,于UPFC的并联侧节点电压控制回路和串联侧有功控制回路中同时加入设计好的附加阻尼控制器,并且根据遗传算法的优化结果调整其参数。

三种情况下汽轮发电机转速偏差振荡情况如图7所示。

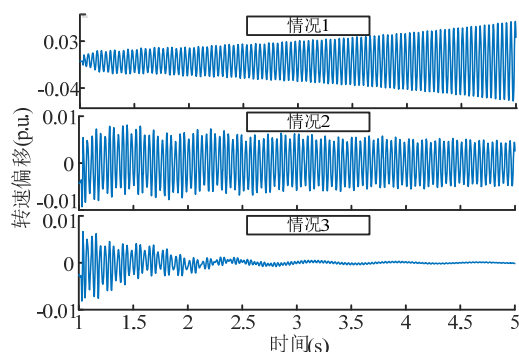


图7 发电机转速偏移振荡情况

根据图7,可以得出如下结论,IEEE推荐的第二标准模型,其由于线路中存在串补电容,扰动后,轴系将会振荡发散,发生次同步振荡,如情况1所示;当在其含串补电容的线路中接入UPFC,系统在扰动后,轴系振荡慢慢衰减,次同步振荡得到了初步抑制,如情况2所示;在UPFC的并联侧和串联侧同时接入附加阻尼控制器后,发电机轴系扰动后的振荡衰减速度最快,如情况3所示。以上仿真结果与图6所计算得到的电气阻尼结果一致,充分说明本文结论的正确性。

4 结论

本文利用复转矩系数分析法,推导出含UPFC电力系统的电气复转矩系数表达式,指出当系统因附加阻尼控制器增加的电气复转矩系数的相位在固有扭振频附近为 90° 时,可以在该频率最大程度的提供正阻尼。根据上述抑制原理,提出UPFC串并联侧附加阻尼控制器协调抑制次同步振荡策略。以附加阻尼相位补偿最优为目标,通过遗传算法快速优化UPFC控制器的参数,以使因UPFC串并联侧控制器能最大限度的增加固有扭振频附近的阻尼来抑制次同步振荡。算例分析和仿真均证明了本文所

提出的策略能够良好的抑制电力系统次同步振荡。

参考文献:

- [1] IEEE Committee Report. Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations[J]. IEEE Trans. on PAS, 1985, PAS-104(6): 1326-1334.
- [2] 赵欣,高山,张宁宇. SVC接入位置对次同步振荡的影响机理与SVC控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 107-114.
- [3] 赵欣. 含并联型FACTS的电力系统次同步振荡分析与抑制[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- [4] 吴英俊. TCSC对电力系统次同步振荡阻尼特性的影响[D]. 江苏南京: 东南大学, 2009.
- [5] L. Gyugyi, C. D. Schauder, "The Unified Power Flow Controller-A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 1085-1097.
- [6] 张帆,徐政. 静止同步串联补偿器控制方式及特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 75-80.
- [7] 颜伟,朱继忠,孙洪波,徐国禹. UPFC的潮流控制与暂态稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 57-61.
- [8] 刘赞,吕厚余,候世英. 利用统一潮流控制器抑制电力系统低频振荡[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(7): 74-77.
- [9] 黄万能. 利用UPFC提高电力系统阻尼的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [10] 李岩松. 基于统一潮流控制器的阻尼次同步谐振的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 1999.
- [11] 顾威,李兴源,王渝红,穆子龙,魏巍. UPFC对风电场次同步谐振的抑制作用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 101-105.
- [12] "SECOND BENCHMARK MODEL FOR COMPUTER SIMULATION OF SUBSYNCHRONOUS RESONANCE", by IEEE Subsynchronous Resonance Working Group of the Dynamic System Performance Subcommittee Power System Engineering Committee; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 5, May 1985.
- [13] 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): 1-4.
- [14] IEEE subsynchronous resonance taskforce. Second benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power

Apparatus and Systems, 1985, 104(5): 1057-1066.

[15]张帆, 徐政. 附加励磁阻尼控制抑制次同步谐振研究[J].

电力系统自动化, 2007, 31(23): 24-29

[16]吴熙, 蒋平. SEDC 与 TCSC 联合抑制次同步振荡的研究

[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 179-185

作者简介:

蔡 晖 (1984-), 男, 江苏南京人, 工程师, 研究方向为
电力系统规划与运行;

王海潜 (1963-), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 研究方
向为电力系统规划与运行;

季杭为 (1993-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方
向为电力系统规划与运行;

高 山 (1973-), 男, 江苏南京人, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、电网规划、
分布式发电协调控制等;

李 颖 (1974-), 男, 江苏徐州人, 高级工程师, 研究方
向为电力系统规划研究;

赵 欣 (1983-), 男, 江苏南京人, 副研究员, 研究方向
为电力系统运行与控制、电网规划、分布式发电协
调控制等;

陆 军 (1991-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方
向为电力系统稳定与控制。