统一潮流控制器附加阻尼抑制次同步谐振的理论与仿真

朱鑫要1,金 梦2,李建生1,陈 静1

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院,江苏省南京市 211103;2. 国网江苏省电力公司检修分公司,江苏省南京市 211102)

摘要:随着串联电容补偿输电的推广应用,中国电力系统面临着严峻的次同步谐振(SSR)问题。 针对 SSR 问题,文中基于采用电流控制模式的统一潮流控制器(UPFC),提出了一种 UPFC 附加 阻尼控制抑制 SSR 的方法;首先选择了附加阻尼控制信号接入 UPFC 控制器的位置,然后设计了 UPFC 附加次同步阻尼控制器(SSDC),并推导了其抑制系统 SSR 的机理,且所设计的 SSDC 采用 了模态分离控制以达到抑制多模态 SSR 的目的。最后,综合利用复转矩系数和时域仿真的方法, 对所设计的 UPFC 装置 SSDC 抑制 SSR 的有效性进行了分析和仿真。结果表明,所设计的 SSDC 在有效抑制 SSR 的同时,不会影响系统和 UPFC 装置的正常运行。

关键词:次同步谐振;统一潮流控制器;附加次同步阻尼控制器;串联电容补偿;复转矩系数

0 引言

随着"西电东送"电力发展战略的推进,为满足 远离负荷中心的大型电源基地电力外送需求,串联 电容补偿输电在中国得到了广泛的应用;然而,串联 电容补偿输电在带来巨大经济性的同时,也使电力 系统面临着严峻的次同步谐振(SSR)问题^[1-4]。

目前学术界和工业界已对附加励磁阻尼控制 (SEDC)^[1]、晶闸管控制电抗器(TCR)^[5]、静止无功 补偿器(SVC)^[67]、晶闸管控制串联电容器 (TCSC)^[8]等多种SSR抑制方案进行了充分的研究 论证,并已投入工程应用。较之于TCR,SVC, TCSC等采用晶闸管半控器件的柔性交流输电系统 (FACTS),采用全控电力电子器件的静止同步补偿 器(STATCOM)、静止同步串联补偿器(SSSC)等新 型FACTS装置具有更好的调节速度和特性^[9];因 此,学术界也在利用STATCOM和SSSC进行SSR 抑制方面开展了大量的研究^[10-14]。

统一潮流控制器(UPFC)同时具备无功补偿、 系统电压调节、线路有功/无功潮流调节等功能,是 目前功能最为强大的 FACTS 装置。但在利用 UPFC装置进行电力系统 SSR 抑制方面,目前的研 究和成果还较为初步和欠缺。文献[15-16]研究了 采用电压控制模式的 UPFC 本身对系统 SSR 的影 响作用;文献[17]优化了 UPFC 的控制器参数,并 通过仿真研究了 UPFC 自身对系统 SSR 的抑制作 用;文献[18]基于模糊控制的方法,设计了 UPFC 并联侧换流器 SSR 附加控制器;文献[19]基于采用 电压控制模式的 UPFC 模型,设计了 UPFC 串联侧 换流器的 SSR 阻尼控制器,但所设计的 UPFC 串联 侧换流器仅具备 SSR 抑制的功能,而无调节系统潮 流的能力。

本文针对 UPFC 附加阻尼控制抑制 SSR 的问题,设计了基于模态分离控制原理的 UPFC 附加次同步阻尼控制器(SSDC),并推导了其抑制 SSR 的原理;最后,综合采用复转矩系数和时域仿真的方法,分析和验证了所设计的 UPFC 串联侧换流器和并联侧换流器 SSDC 抑制 SSR 的有效性。

1 UPFC 模型

UPFC 装置主要由串/并联侧变压器-换流器、 直流电容等组成,其串/并联侧换流器分别向系统注 入幅值和相角可控的电压。UPFC 直流电容电压由 串/并联侧换流器的交换功率共同决定,忽略换流器 损耗,则直流电容存储的能量变化等于并联侧换流 器和串联侧换流器吸收的功率之和,即

$$CU_{\rm dc} \frac{\mathrm{d}U_{\rm dc}}{\mathrm{d}t} = \operatorname{Re}(\dot{U}_{\rm sh}\dot{I}_{\rm sh}^* + \dot{U}_{\rm se}\dot{I}_{\rm se}^*)$$
(1)

式中: $C 和 U_{dc}$ 分别为直流电容值和直流电压; U_{se} 和 \dot{U}_{sh} 分别为 UPFC 串/并联侧换流器输出电压; \dot{I}_{se} 和 \dot{I}_{sh} 分别为 UPFC 串/并联侧换流器出口支路电流;

收稿日期:2015-08-26;修回日期:2015-12-29。 上网日期:2016-07-11。

国家电网公司科技项目(SGRI-DL-71-14-002)。

变量下标 se 和 sh 分别表示 UPFC 串/并联侧相关量(下同)。UPFC 接线示意及等值电路详见附录A。

在 *dq* 旋转坐标下, UPFC 并联侧换流器、串联 侧换流器出口支路电压方程分别为:

$$\begin{cases} U_{\rm shd} = U_{\rm 1d} - r_{\rm sh}I_{\rm shd} - L_{\rm sh}\frac{\mathrm{d}I_{\rm shd}}{\mathrm{d}t} + \omega_{\rm s}L_{\rm sh}I_{\rm shq} \\ U_{\rm shq} = U_{\rm 1q} - r_{\rm sh}I_{\rm shq} - L_{\rm sh}\frac{\mathrm{d}I_{\rm shq}}{\mathrm{d}t} - \omega_{\rm s}L_{\rm sh}I_{\rm shd} \end{cases}$$

$$(2)$$

$$\begin{cases} U_{sed} = U_{12d} + r_{se1}I_{sed} + L_{se1}\frac{dI_{sed}}{dt} - \omega_{s}L_{se1}I_{seq} \\ U_{seq} = U_{12q} + r_{se1}I_{seq} + L_{se1}\frac{dI_{shq}}{dt} + \omega_{s}L_{se1}I_{sed} \end{cases}$$
(3)

式中: ω_s 为系统工频角频率; r_{sh}和 L_{sh}分别为并联侧 换流器出口支路电阻和电感; r_{sel}和 L_{sel}分别为串联 侧换流器出口支路电阻和电感; U₁和 U₁₂分别为 UPFC 并联侧变压器接入节点电压、UPFC 串联侧 变压器串入线路电压。

本文中 UPFC 的控制功能为调节节点电压 \dot{U}_1 、调节线路有功/无功潮流。并联侧换流器采用接入 点电压 \dot{U}_1 定向的dq解耦控制,将并联侧换流器控 制所采用的dq坐标d轴定向于矢量 \dot{U}_1 ,即 $U_{1d} = U_1, U_{1q} = 0$,从而可通过分别控制d轴和q轴 电流 I_{shd} 和 I_{shq} 来实现对并联侧换流器所吸收有功 和无功功率的调节,进而达到维持直流电容电压恒 定、调节节点电压 \dot{U}_1 的目的。并联侧换流器控制器 结构如图 1(a)所示。

串联侧换流器采用接入点电压 \dot{U}_2 定向的 dq 解 耦控制,将串联侧换流器控制所采用的 dq 坐标 d 轴定向于矢量 \dot{U}_2 ,即 $U_{2d} = U_2$, $U_{2q} = 0$,从而可通 过分别控制 d 轴和 q 轴电流 I_{seq} 来实现对 UPFC 注入 U_2 节点的有功和无功功率的调节,进而 实现对线路有功功率 P_{se} 、无功功率 Q_{se} 的控制。串 联侧换流器控制器结构如图 1(b)所示。

为提高系统 SSR 的阻尼,需控制 UPFC 装置向 系统注入对应频率的次同步电流;而本文 UPFC 串/并联侧换流器控制均采用的电流控制模式,故可 将 UPFC 装置的 SSDC 信号叠加至 UPFC 装置相 应的电流内环控制指令处。

由于维持直流电容电压恒定是保持 UPFC 装置正常运行的首要条件,故不考虑将抑制 SSR 的SSDC 信号叠加至 UPFC 并联侧换流器的直流电压

控制回路;同时,为减少对系统功率的扰动,亦不考虑在 UPFC 串联侧换流器的有功控制回路叠加 SSDC 信号。如图 1 所示,本文中 UPFC 串/并联侧 换流器 SSDC 信号 u_{damp}分别叠加至并联侧交流母 线电压、串联侧无功控制回路的电流内环控制指令 处。





2 UPFC 附加次同步阻尼控制器

2.1 SSDC 结构

为达到抑制多模态 SSR 的目的, UPFC 串/并 联侧换流器 SSDC 均采用模态分离的多通道控制器 结构, 如图 2 所示。



图 2 中对模态 *i* 控制回路而言,首先通过模态 *i* 滤波器获取机组轴系转速偏差信号中的模态 *i* 分量,并滤除其他模态分量;然后,经过比例放大、相位补偿和限幅后,即得到该模态的次同步阻尼控制附加指令,并叠加至 UPFC 主控制回路。设机组轴系转速中模态 *i* 分量的幅值为 *A_i*、初相位为 *q_{i0}*,则有SSDC 输出的该模态阻尼信号为:

 $u_{dampi} = k_i A_i \sin(\omega_i t + \varphi_{i0} + \theta_i)$ (4) 式中: $k_i \pi \theta_i$ 分别为模态 *i* 控制回路的放大倍数和 相移。

若系统各 SSR 模态均稳定,即
$$A_i = 0$$
,则有
 $u_{damp} = \sum u_{dampi} = 0$ (5)

即 SSDC 输出为 0,不会影响系统和 UPFC 装置的 正常运行。

2.2 SSDC 阻尼 SSR 原理

采用电流控制模式的 UPFC 串/并联侧换流器 可快速跟踪其内环电流控制指令,故在串/并联侧换 流器矢量定向控制的 dq 坐标下,其输出的模态 i 频 率的次同步电流分别为:

$$\begin{cases} I_{\text{sub_shi}} = \frac{1}{1 + T_{\text{sh}}s} k_{i\text{sh}}A_{i}\sin(\omega_{i}t + \varphi_{i0} + \theta_{i\text{sh}}) \\ I_{\text{sub_sei}} = \frac{1}{1 + T_{\text{se}}s} k_{i\text{se}}A_{i}\sin(\omega_{i}t + \varphi_{i0} + \theta_{i\text{se}}) \end{cases}$$

$$(6)$$

式中: T_{sh}和 T_{se}分别为并联侧换流器和串联侧换流器的响应延迟。

若装设在发电厂出口的输电线路上,则 UPFC 并联侧换流器注入系统的次同步电流通路如 图 3(a)所示。



图 3 UPFC 并联侧换流器注入机组次同步电流示意图 Fig.3 Diagram of the current injected by UPFC shunt converter

对 UPFC 并联侧换流器而言,在其矢量定向控制的 dq 坐标下, UPFC 并联侧换流器从发电机电枢绕组抽取的次同步电流为:

$$I_{\text{gen_sh}i} = \frac{Z_{\text{sys_sub}i}}{Z_{\text{gen_sub}i} + Z_{\text{sys_sub}i}} I_{\text{sub_sh}i} =$$

 $G_{ish}k_{ish}A_i \sin(\omega_i t + \varphi_{io} + \theta_{ish} + \phi_{ish})$ (7) 式中: G_{ish} 和 ϕ_{ish} 分别为 UPFC 并联侧换流器和系统 对模态 *i* 信号的幅频响应和相频响应。

对于采用接入点电压 \dot{U}_1 定向控制的并联侧换 流器,发电机机端电压 \dot{U}_G 与次同步电流 \dot{I}_{gen_shi} 的相 位关系如图 3(b)所示,图中 δ_{sh} 为发电机机端电压 超前 UPFC 并联侧接入点电压 \dot{U}_1 的角度。

从而,可得 UPFC 并联侧换流器输出的模态 *i* 次同步电流所产生的附加次同步转矩为:

$$\Delta T_{ei_sh} = \frac{U_G I_{gen_shi} \sin \delta_{sh}}{\omega_G}$$
(8)

式中:ω_G为发电机转速,在稳态下ω_G≈1(标幺值),

从而有

 $\Delta T_{\rm ei_sh} \approx U_{\rm G} I_{\rm gen_shi} \sin \delta_{\rm sh} =$

 $U_{G}G_{ish}k_{ish}A_{i}\sin(\omega_{i}t+\varphi_{i0}+\theta_{ish}+\phi_{ish})\sin\delta_{sh}$ (9)

同理,可得 UPFC 串联侧换流器输出的模态 i次同步电流所产生的附加次同步转矩约为: $\Delta T_{ei_{se}} \approx U_G I_{gen_{sei}} \sin \delta_{se} =$

$$U_{\rm G}G_{i\rm se}k_{i\rm se}A_{i}\sin(\omega_{i}t+\varphi_{i0}+\theta_{i\rm se}+\phi_{i\rm se})\sin\delta_{\rm se}$$
(10)

式中: G_{ise} 和 ϕ_{ise} 分别为 UPFC 串联侧换流器和系统 对模态 i 信号的幅频响应和相频响应; δ_{se} 为发电机 机端电压超前 UPFC 串联侧接入点电压 \dot{U}_2 的角度。

由式(9)和式(10)及复转矩系数法原理^[20-21]可知,调整 UPFC 串/并联侧换流器 SSDC 模态 *i* 控制回路的相移 θ_i 及放大倍数 k_i ,使其在发电机中产生正的、足够大的附加电磁转矩 ΔT_{ei} ,即可实现对该模态 SSR 的抑制。可见,UPFC 串/并联侧换流器 SSDC 均具备抑制 SSR 的能力,故可分别独立设计UPFC 串/并联侧换流器 SSDC 参数,然后通过仿真分析和验证 UPFC 串/并联侧换流器 SSDC 共同作用时的相互影响和 SSR 抑制效果。

3 算例分析

3.1 算例介绍

本文所采用的算例系统结构如图 4 所示。系统 中线路 1 装设有 45%的固定串联电容补偿,2 台 600 MW 机组均采用国内某型机组的实际参数,轴 系均由高-中压缸质量块(HIP)、低压缸 B 质量块 (LBP)、低压缸 A 质量块(LAP)和发电机质量块 (GEN)4 质量块组成,轴系相应的 3 个自然扭振模 态频率分别为 13.34 Hz(模态 1)、22.72 Hz(模态 2) 和 27.74 Hz(模态 3)^[6]。



3.2 复转矩系数分析

在 UPFC 串/并联侧换流器的 SSDC 投入运行 与否时,机组电气阻尼系数分析计算结果如图 5 所 示。

46



Fig.5 Electric damping coefficient of the system

由图 5 的分析结果及复转矩系数法原理^[21-22]可知,UPFC 串/并联侧换流器 SSDC 均未投入运行时,系统在轴系模态 3(27.74 Hz)处存在较为严重的负阻尼而不稳定;而在 UPFC 串联侧换流器 SSDC 和/或并联侧换流器 SSDC 投入运行后,系统在 3 个轴系模态频率处阻尼为正,系统 SSR 稳定。同时,由图 5 可知,在本文所设计的控制器参数下,较之于仅串联侧换流器 SSDC 或仅并联侧换流器 SSDC 投入运行的情况,串/并联侧换流器 SSDC 均大运行时,系统阻尼最大。

3.3 时域仿真分析

利用 PSCAD/EMTDC 仿真平台,在 UPFC 串/ 并联侧换流器 SSDC 投入运行与否的情况下,对上 述系统进行小扰动情况下的电磁暂态仿真分析,结 果如下。

仿真设置为:初始时,UPFC 串/并联侧换流器 SSDC 均不投入运行;4 s 时将 UPFC 串/并联侧换 流器 SSDC 同时投入运行,仿真结果如图 6 所示。

由图 6(a)和(b)可知,在 UPFC 串/并联侧换流器 SSDC 均未投入运行的情况下,机组轴系模态 1 和模态 2 均可保持稳定,而模态 3(27.74 Hz)发散失 稳;UPFC 串/并联侧换流器 SSDC 投入运行后,系 统 SSR 迅速收敛稳定。同时,由图 6(c)可知, UPFC 换流器 SSDC 对系统和 UPFC 装置的正常运 行没有影响。

若在4 s 时分别仅将 UPFC 串联侧换流器 SSDC 或并联侧换流器 SSDC 投入运行,系统 SSR 亦迅速收敛稳定,且对系统和 UPFC 装置的正常运 行没有影响。仿真结果详见附录 B。

综合图 6 及附录 B 仿真结果可知,时域仿真分析结果与图 5 的复转矩系数分析结果一致,UPFC 串/并联侧换流器 SSDC 均可有效阻尼系统 SSR,且 UPFC 串/并联侧换流器 SSDC 同时作用时对系统

SSR 的抑制效果最好。



图 6 串/并联侧换流器 SSDC 投入后系统仿真结果 Fig.6 Simulation result of the system with SSDCs of the series and parallel converters

4 结语

本文设计了一种 UPFC 附加次同步阻尼控制器,并推导了其抑制电力系统 SSR 的机理。所设计的 UPFC 附加次同步阻尼控制器采用了模态分离控制的结构,以达到多模态 SSR 抑制的目的。最后,综合采用复转矩系数法和基于 PSACD/EMTDC 的电磁暂态仿真,验证了所设计的 UPFC 串联侧换流器 SSDC 和并联侧换流器 SSDC 对系统 SSR 的抑制作用;仿真结果同时表明,本文所设计的 SSDC 不会影响系统和 UPFC 装置的正常运行。

为进一步推进 UPFC 附加阻尼控制抑制 SSR

的研究, UPFC 串联侧换流器 SSDC 和并联侧换流器 SSDC 之间的相互影响, 以及两者参数的协调整定以达到最优阻尼将是后续研究的重点。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info. com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

- [1] XIE Xiaorong, GUO Xijie, HAN Yingduo. Mitigation of multimodal SSR using SEDC in the Shangdu series-compensated power system [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(1): 384-391.
- [2] 林敏,李杰.500 kV 串联补偿装置自触发及主间隙放电分散性研究[J].江苏电机工程,2014,33(6):20-22.
 LIN Min, LI Jie. Research on self-trigging and spark gap

discharge dispersion of 500 kV series compensator[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(6): 20-23.

- [3] ZHU Xinyao, SUN Haishun, WEN Jinyu, et al. A practical method to construct network state equations in multi-machine system SSR study[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 107: 51-58.
- [4] 陆晶晶,肖湘宁,张剑,等.次同步振荡动态稳定器抑制弱阻尼次
 同步振荡的机理与实验[J].电力系统自动化,2015,39(4):135-140.DOI:10.7500/AEPS20140702002.
 LU Jingjing, XIAO Xiangning, ZHANG Jian, et al. Mechanism

and experiment of subsynchronous oscillation-dynamic stabilizer for suppressing subsynchronous oscillation with weak damping [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 135-140. DOI: 10.7500/AEPS20140702002.

- [5] RAMEY D G, KIMMEL D S, DORNEY J W, et al. Dynamic stabilizer verification tests at the San Juan station [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 10(12): 5011-5019.
- [6] ZHU Xinyao, SUN Haishun, WEN Jinyu, et al. Improved complex torque coefficient method using CPCM for multimachine system SSR analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 26(5): 2060-2068.
- [7] 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.DOI:10.7500/AEPS20130909011.

DONG Feifei, LIU Dichen, WU Jun, et al. Design of SVC subsynchronous damping controller based on improved biogeography based optimization algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 56-60. DOI: 10.7500/AEPS20130909011.

- [8] 周孝信,郭剑波,林集明,等.电力系统可控串联电容补偿[M].北 京,科学出版社,2009.
- [9] LI Canbing, XIAO Liwu, CAO Yijia, et al. Optimal allocation of multi-type FACTS devices in power systems based on power flow entropy[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(2): 173-180.
- [10] 王冠青,孙海顺,朱鑫要,等.STATCOM 附加电压控制抑制次 同步谐振的理论和仿真[J].电力系统自动化,2013,37(11):33-38.

WANG Guanqing, SUN Haishun, ZHU Xinyao, et al. Theory and simulation of STATCOM supplementary voltage control to damp subsynchronous resonance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 33-38.

- [11] PADIYAR K R, PRABHU N. Design and performance evaluation of subsynchronous damping controller with STATCOM[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1398-1405.
- [12] XIE Xiaorong, ZHANG Yuanqu, LI Zhipeng. Damping multimodal subsynchronous resonance using a generator terminal subsynchronous damping controller [J]. Electric Power Systems Research, 2013, 99(99): 1-8.
- [13] THIRUMALAIVASAN R, JANAKI M, PRABHU N. Damping of SSR using subsynchronous current suppressor with SSSC[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(1): 64-74.
- [14] BONGIORNO M, ANGQUIST L, SVENSSON J. A novel control strategy for subsynchronous resonance mitigation using SSSC[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 1033-1041.
- [15] PADIYAR K R, PRABHU N. Investigation of SSR characteristics of unified power flow controller [J]. Electric Power Systems Research, 2005, 74(2): 211-221.
- [16] THIRUMALAIVASAN R, PRABHU N, JANAKI M, et al. Analysis of subsynchronous resonance with generalized unified power flow controller [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 53: 623-631.
- [17] ALHARBI Y M, SIADA A A, ABDOU A F. Application of UPFC on stabilizing torsional oscillations and improving transient stability [C]// Australasian Universities Power Engineering Conference, September 29-October 3, 2013, Hobart, TAS, Australia: 1-4.
- [18] HOSSEINI H, BOUDAGHI A, MEHRI A, et al. Mitigating subsynchronous resonance in hybrid system with steam and wind turbine by UPFC[J]. International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, 2012, 4(2): 176-181.
- [19] 李岩松,郭家骥,刘君.UPFC 暂态数学模型及其应用[J].电力系统自动化,2000,24(21):31-34.
 LI Yansong, GUO Jiaji, LIU Jun. Mathematics model of UPFC during transient and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(21): 31-34.
- [20] 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.
 XU Zheng. The complex torque coefficient approach's applicability analysis and it's realization by time domain simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 2-5.
- [21] CANAY I M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine: Part I [J].IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1982, 101(10): 3630-3638.

朱鑫要(1987—)男,通信作者,博士,工程师,主要研究 方向:柔性交流输电系统建模、系统稳定分析与控制。 E-mail: xyzhu880125@yeah.net

金 梦(1988—)女,硕士,主要研究方向:电力系统规 划、电力系统状态检修。

李建生(1986—),男,博士,工程师,主要研究方向:柔性 交流输电系统建模、电气设备状态评估。

(编辑 代长振)

(下转第 97 页 continued on page 97)

Theory and Simulation of Supplementary Damping Control for Unified Power Flow Controller to Mitigate Subsynchronous Resonance

ZHU Xinyao¹, JIN Meng², LI Jiansheng¹, CHEN Jing¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: With the widespread application of series compensated capacitors, the power systems are facing the severe problem of subsynchronous resonance (SSR) in China. To solve the SSR problem, a method of supplementary damping control for unified power flow controller (UPFC) is proposed based on the UPFC with current control mode. The positions of supplementary subsynchronous damping signal accessing to UPFC controller are chosen at first. The UPFC supplementary subsynchronous damping controller (SSDC) is designed, and the principle how to damp SSR is deduced as well. Besides, the mode-splitting control is used in the designed SSDC to mitigate the multi-modal SSR. Finally, the complex torque coefficient and time domain simulation are both performed to analyze and verify the effectiveness of damping SSR with the designed SSDC. Meanwhile, the simulation results also suggest that the designed SSDCs have none negative effect on the performance of UPFC and the system.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SGRI-DL-71-14-002).

Key words: subsynchronous resonance (SSR); unified power flow controller (UPFC); supplementary subsynchronous damping controller (SSDC); series capacitor compensation; complex torque coefficient