

某实际电网中装设的矢量控制UPFC的阻尼转矩分析

以某实际电网为研究背景, 首先介绍了统一潮流控制器 (Unified Power Flow Controller, UPFC) 矢量控制的原理, 随后对该实际电网进行了线性化, 并在此基础上介绍了阻尼转矩分析 (Damping Torque Analysis, DTA) 方法, 将其用于分析装有矢量控制UPFC的该电网中附加阻尼控制器是如何通过各台发电机向目标振荡模态提供阻尼的, 然后以图形的形式展现出来, 随后求得了DTA指标, 且与模态分析法结果进行验证, 证明了DTA方法的正确性, 并选出了附加阻尼控制器在UPFC上的最佳安装通道。

李海峰¹ 张建鹏² 陈 中³ 徐 贤¹ 杜文娟²/1. 江苏省电力公司 2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室 3. 东南大学电气工程学院

0 引言

统一潮流控制器 (Unified Power Flow Controller, UPFC) [1-2] 在电力系统中的作用主要包括提高系统可控性、提高系统功率输送能力和运行稳定性。截至目前, 世界上真正投入工业化运行的UPFC仅有三套: 美国电力公司Inez变电站138 kV/80 MV·A的UPFC^[3]; 韩国电力公司Kangjin变电站154 kV/80 MV·A的UPFC; 美国纽约电力局Marcy变电站345 kV/200 MV·A的UPFC。

我国某实际电网的西环网结构如图1所示, 该电网主要供电范围包括GH区、JY区、QXG区和YH区。目前, 该区域供电电源主要由500 kV地区A、地区B从南北两端共同供电。然而该电网存在着两个主要问题: ①输电通道潮流不均衡。地区B向西环网的220 kV输电通道潮流较轻, 而地区A向西环网的220 kV输电通

道潮流偏重, 其中尤以220 kV地区C南送地区D和E断面潮流过重问题特别严重, 导致地区C南送断面存在 $N-1$ 过载问题。②2016年夏季高峰负荷时, 500 kV地区F变电站升压, 由于电缆建设问题, 却不能投运配套的220 kV地区F至地区G第二输电通道, 常规措施无法满足西环网负荷的增长。

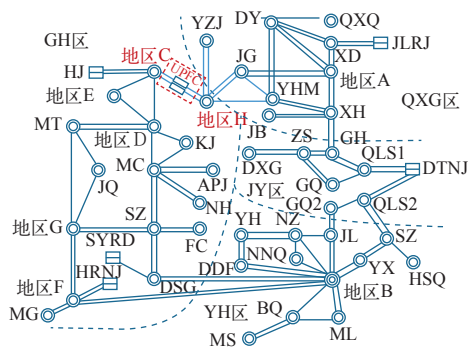


图1 UPFC在该电网西环网的接入方案

该地区西环网的输电通道潮流不均衡现象以及2016年左右开始出现输电瓶颈问题, 大大降低了该电网的整体供电能力和安全可靠水平。为适应电网发展的需求, 在该地电网的规划发展中, 研究采用UPFC作为常规电网技术的必要补充, 不仅能够有效控制电网潮流, 而且可以提高现有电网的输电能力, 还能够很好地适应未来电网网架的变化, 取得良好的经济效益和社会效益^[4-5]。因此, 加装UPFC对这样一个规模大、新建输电走廊代价大的电网来讲尤其必要, 加装UPFC成为满足该地区2016年及远景电网发展的首选措施。

本文以该电网为背景, 研究了在该电网西环网地区C和地区H之间加装



李海峰/研究员级高工

关键词/Keywords

矢量控制 ·
UPFC ·
阻尼转矩分析法 ·
模态分析法 ·

国网公司科技资助项目 (SGJS0000DKJS1501080),
国家自然科学基金资助项目 (51277029)。

UPFC后, 其阻尼控制器对该电网低频振荡稳定性^[6-8]的影响, 研究附加在UPFC四个不同通道上的阻尼控制器向目标振荡模态提供阻尼的情况, 为UPFC的安装运行提供可靠依据。

1 UPFC矢量控制原理

UPFC传统控制方式基于相角控制^[9-10]，该电网中的UPFC采用的是矢量控制^[11-13]方式。

UPFC通过控制串联、并联变换器实现对线路有功、无功以及接入端节点电压的控制。其控制器的结构多种多样,既有基于最优控制、神经网络的智能控制器,也有基于线性理论的PI控制器。该电网中矢量控制UPFC的控制器采用的是PI控制器,其控制参数相互独立,易于实现。

传统相角控制UPFC的一个控制通道采用一个控制器，矢量控制UPFC的一个控制通道由内环和外环两个控制器组成，较相角控制可以更快实现动态响应。矢量控制系统的串联变换器控制和并联变换器控制分别如图2、图3所示，其内环均为电流环，串联变换器外环为功率环，并联变换器外环则为电压环。以图2串联变换器有功控制为例说明矢量控制原理，采集到的线路有功功率 P 与给定参考信号 P_{ref} 比较后，偏差信号传入外环PI控制器，经外环控制器处理计算得到串联侧电流 q 轴分量的参考信号 $i_{b\text{ref}}$ ， $i_{b\text{ref}}$ 与采集计算得到的 q 轴电流

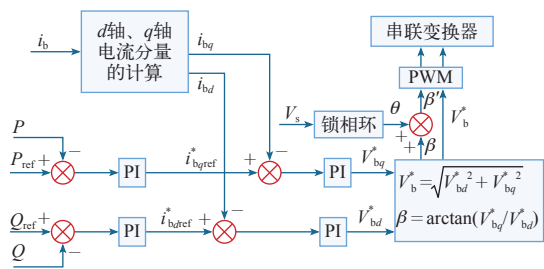


图2 UPFC串联变换器矢量控制图

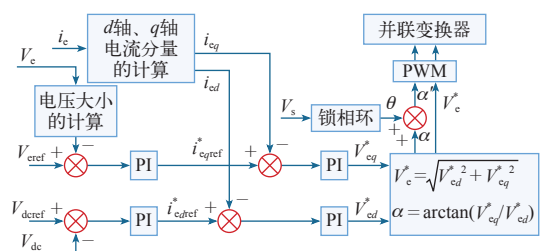


图3 UPFC并联变换器矢量控制图

分量 i_{bq} 比较后,偏差信号经内环控制器,得到串联变换器输出电压 q 轴分量的参考信号 V_{bq}^* ,同理通过控制无功功率 Q 可以得到 V_{bd}^* ,信号 V_{bd}^* 和 V_{bq}^* 经计算转化为串联电压模值 V_b^* 和相角 β ,由锁相环提供线路角度 θ ,电压从 dq 坐标系转化到 abc 坐标系,进而控制串联侧变换器的输出电压,达到控制线路有功功率 P 的目的。

对UPFC另外三个通道的控制原理与对线路有功功率 P 的控制类似。

2 装有UPFC的该电网线性化模型

将UPFC数学模型线性化, 根据网络结构将其用状态变量和控制信号 ΔU_{PSS} 加以表示, 并与该电网的状态方程整合, 便可以得到装有UPFC的该电网线性化方程。

线性化方程的矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{\boldsymbol{\delta}} \\ \Delta \dot{\boldsymbol{w}} \\ \Delta \dot{\boldsymbol{U}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \boldsymbol{w}_0 \boldsymbol{I} & \mathbf{0} \\ \boldsymbol{E}_{21} & \boldsymbol{E}_{22} & \boldsymbol{E}_{23} \\ \boldsymbol{E}_{31} & \boldsymbol{E}_{32} & \boldsymbol{E}_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \boldsymbol{\delta} \\ \Delta \boldsymbol{w} \\ \Delta \boldsymbol{U} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \boldsymbol{B}_{3k} \end{pmatrix} \Delta U_{\text{PSS}} \quad (1)$$

式中, ΔU_{PSS} 为附加阻尼控制器输出信号, 也称为 UPFC 的控制输入信号; $\boldsymbol{U}$ 为除了功角和转速之外的发电机和 UPFC 的状态变量; $\boldsymbol{B}_{3k}$ 为阻尼控制器输出信号 ΔU_{PSS} 到 UPFC 自身状态变量的传递函数。

系统输出变量 Δy 可以用状态变量表示为

$$\Delta y = C_n \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta w \\ \Delta U \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, 附加阻尼控制器采用系统输出信号 Δy 作为

反馈输入信号; C_n 为状态变量 $\begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta U \end{pmatrix}$ 到附加阻尼控

制器输入信号 Δy 的传递函数。

附加阻尼控制器自身的传递函数为

$$\Delta U_{\text{PSS}} = T(s)\Delta y \quad (3)$$

式(1)~式(3)构成了含UPFC的该电网线性化方程。

3 DTA原理

柔性交流输电技术 (Flexible Alternating Current)

Transmission System, FACTS) 与系统的动态稳定交互影响机理研究是极大的难点, 其难度在于方法的选取。目前的方法大多是基于模态分析法^[14-15], 但模态分析法是直接黑箱计算的结果, 除了结果没有其他信息可用。阻尼转矩分析 (Damping Torque Analysis, DTA) 方法^[16-18]从单机扩展到多机时, 其理论推导和编程远比模态分析法复杂, 其有效信息的提取也更困难, 但DTA方法针对低频振荡机理的分析清晰明确, 可以具体看出阻尼控制器向目标模态提供的阻尼是如何在系统各台发电机间传递以及分配的。

根据系统状态式(1)，画出传递函数框图，如图4所示。

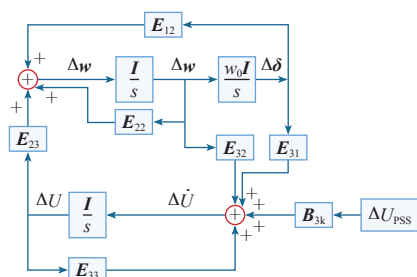


图4 传递函数框图

从图4可以看出,控制信号 ΔU_{PSS} 到发电机机电振荡环节的前向通道函数为

$$F(s) = E_{23}(sI - E_{33})^{-1}B_{3k} \quad (4)$$

根据线性控制理论, 系统输出信号 Δy , 是状态变量的组合, 可以通过单个状态变量进行重构, 因此选择输出信号用各台发电机的角速度 $\Delta\omega_j$ 重构, 为

$$\Delta y = \xi_j(s) \Delta \omega_j \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

如果所研究的目标模态为第 i 个振荡模态,因此针对第 i 个振荡模态,阻尼控制器向系统中第 j 台发电机机电振荡环节提供的阻尼转矩可以用 $\Delta\omega_j$ 表示为

$$\begin{aligned}\Delta T_{Dij} &= \text{Re}[F_j(\lambda_i)\xi_j(\lambda_i)T(\lambda_i)]\Delta\omega_j \\ &= D_{Gij}\Delta\omega_j \quad j=1,2,\cdots,N\end{aligned}\quad (6)$$

式中, $F_j(\lambda_i)$ 为 $\mathbf{F}(\mathbf{s})$ 的第 j 个元素对第 i 个模态的具体形式; D_{Gij} 为针对第 i 个模态向第 j 台发电机提供的阻尼转矩的系数。

式 (6) 表明附加阻尼控制器向系统每一台发

电机都提供阻尼转矩。

系统低频振荡分析关心的是阻尼控制器对弱阻尼目标模态的影响力，关心的是能否提高弱阻尼目标模态阻尼，而不是阻尼控制器向具体每台发电机提供多少阻尼转矩，因为如果该台发电机参与目标模态振荡的程度很低，向其提供再多的阻尼也无济于事，因此阻尼控制器提供的阻尼转矩还需要通过发电机影响振荡模态的阻尼。所以阻尼控制器向各台发电机提供阻尼转矩仅是第一渠道，另外一个渠道则是各台发电机参与目标模态振荡的程度，可以用发电机的灵敏度来衡量。

定义灵敏度系数 S_{ij} 为第 i 个振荡模态的阻尼 ξ_i 对第 j 台发电机机电振荡环节提供的阻尼转矩系数 D_{Gij} 的灵敏度,即

$$S_{ij} = \frac{\partial \xi_i}{\partial D_{Gij}} \quad (7)$$

所以振荡模态的阻尼可表示为

$$\Delta \xi_i = \sum_{j=1}^N \frac{\partial \xi_i}{\partial D_{Gij}} \Delta D_{Gij} = \sum_{j=1}^N S_{ij} \Delta D_{Gij} \quad (8)$$

从上文可得, 阻尼转矩系数的表达式为

$$\Delta D_{Gij} = \text{Re}[F_j(\lambda_i)\xi_j(\lambda_i)\Delta T(\lambda_i)] \quad (9)$$

定义: $F_j(\lambda_i)\xi_j(\lambda_i)=H_{ij}\angle\varphi_{ij}$, $j=1,2,\cdots,N$ 。

所以UPFC附加阻尼控制器向系统第*i*个模态提供的阻尼为

$$\Delta \xi_i = \sum_{j=1}^N S_{ij} \operatorname{Re}[H_{ij} \angle \varphi_{ij} \Delta T(\lambda_i)] \quad (10)$$

该式表明了阻尼控制器通过两组渠道向第 i 个振荡模态提供阻尼：首先通过第一组渠道 $H_{ij} \angle \varphi_{ij}$ 对各个机组的机电振荡环节提供阻尼转矩，然后再通过第二组渠道 S_{ij} 反映各个机组对目标模态振荡的参与性，两组渠道的共同作用表示阻尼控制器对目标模态阻尼的作用。

通过上述分析和式(10),求得DTA指标

$$S_{\text{DTA}}^i = \frac{\Delta\lambda_i}{\Delta T(\lambda_i)} = \sum_{j=1}^N S_{ij} H_{ij} \angle \varphi_{ij} \quad (11)$$

该指标是模态 $\Delta\lambda_i$ 对装设的阻尼控制器传递函数 $\Delta T(s)$ 的灵敏度, 针对所关心的模态 $\Delta\lambda_i$, 通过DTA指标, 调整附加阻尼控制器 $\Delta T(s)$ 的参数, 可以设计出最理想的阻尼控制器, 使得模态向满足

要求的方向移动。

4 DTA方法在该实际电网中的应用

为了方便DTA原理在该电网中的分析应用，在不影响结果的前提下将该电网等效为一个10台

发电机、323个节点及441条支路的系统，其中等效网络中10台发电机的具体参数如表1所示。

该电网加装UPFC之后，UPFC附近潮流分布情况如图5所示。

由于UPFC有四个通道，分别计算了阻尼控制

表1 等效电网中发电机的参数

发电机	S_n (pu)	X_d (pu)	X'_q (pu)	X'_d (pu)	X'_{d0} (pu)	M (pu)	D (pu)	K_A (pu)	T_A /s
G ₁	1 466	2.37	2.31	0.290	8.61	9.01	0	0.95	0.003
G ₂	1 112	2.89	2.56	0.245	8.83	8.51	0	1.8	0.01
G ₃	1 112	2.89	2.56	0.245	8.83	8.51	0	15.2	0.03
G ₄	706	2.26	2.26	0.269	8.38	5.27	0	45.0	0.8
G ₅	776	1.94	1.94	0.233	8.6	8.41	0	35.0	0.18
G ₆	936	2.19	2.11	0.225	6.6	12.5	0	6.2	0.01
G ₇	340	2.07	1.96	0.210	10.2	14.5	0	85.1	0.03
G ₈	150	2.22	2.22	0.236	6.48	6.00	0	37.3	0.25
G ₉	1 334	1.89	1.89	0.272	8.45	3.13	0	100.2	0.05
G ₁₀	706	2.04	1.75	0.249	9.22	5.27	0	780.2	0.003

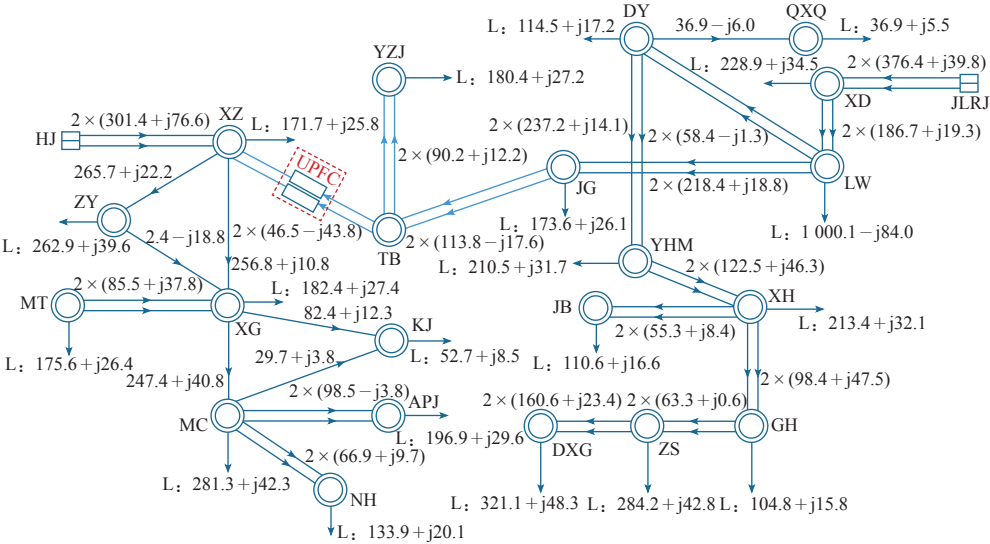


图5 UPFC附近潮流分布图

器附加在四个通道时向系统每台发电机机电振荡环节提供的阻尼转矩，以及每台发电机参与目标模态振荡的程度，为了更加直观，将其用图形表示出来，如图6~图9所示。

在每幅图中，发电机的左半部分数字表示阻尼控制器向系统每台发电机提供的阻尼转矩，即所谓的第一组渠道；发电机的右半部分数字表示每台发电机参与目标模态振荡的程度，即所谓的

第二组渠道，每台发电机两组渠道的数字相乘就表示阻尼控制器通过该台发电机对目标模态阻尼的贡献。

由图6可以看到，等效机G₁、G₂、G₃、G₆和G₇的左半部分数字很大，表明阻尼控制器对等效机G₁、G₂、G₃、G₆和G₇机电振荡环节提供的阻尼转矩很大，但是等效机G₁、G₂、G₆和G₇的右半部分数字却为零，表明等效机G₁、G₂、G₆和G₇完

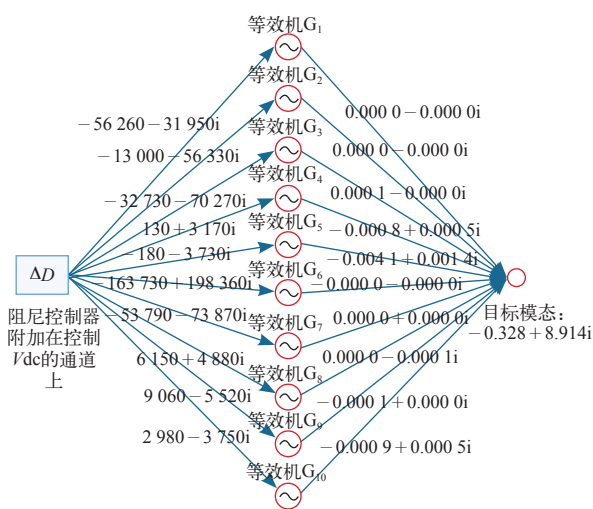


图6 阻尼控制器附加在控制直流电压 V_{dc} 通道时
对目标模式阻尼的传递图

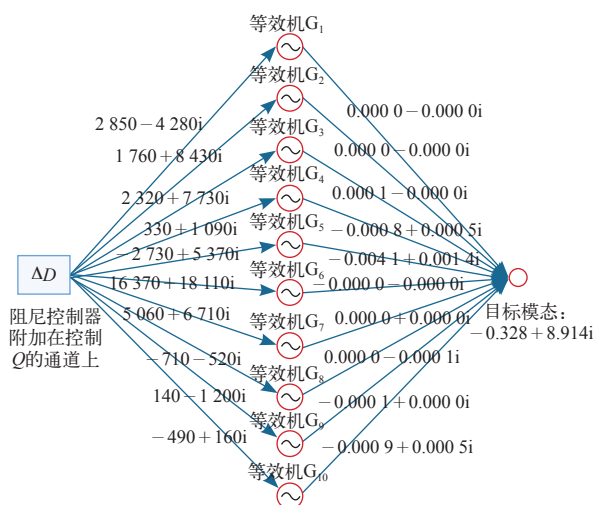


图8 阻尼控制器附加在控制无功功率 Q 通道时
对目标模式阻尼的传递图

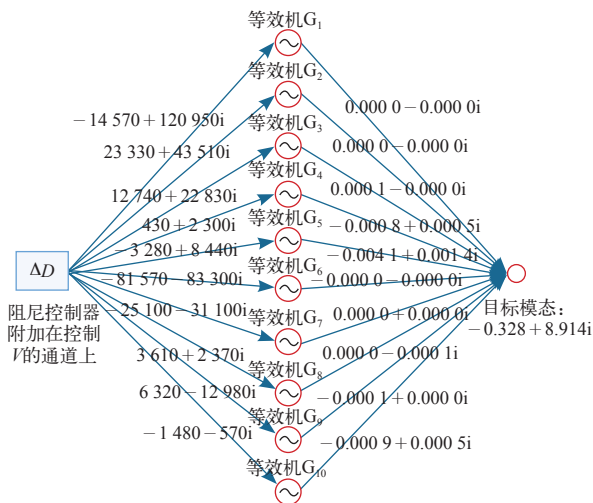


图7 阻尼控制器附加在控制交流电压 V 通道时
对目标模式阻尼的传递图

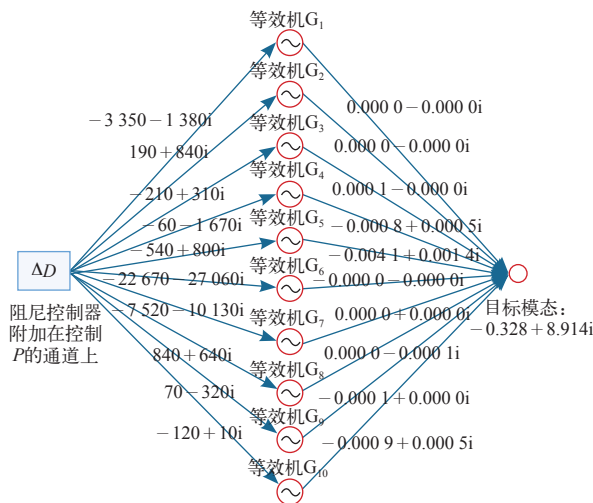


图9 阻尼控制器附加在控制有功功率 P 通道时
对目标模式阻尼的传递图

全没有参与目标模式的振荡，所以阻尼控制器通过 G_1 、 G_2 、 G_6 和 G_7 对振荡模式的阻尼没有任何贡献；虽然阻尼控制器对等效机 G_5 、 G_{10} 的阻尼贡献不是特别大，但是这些等效机组参与目标模式振荡的程度较大，这样左半部分和右半部分两组渠道相乘，控制器通过等效机 G_5 、 G_{10} 对目标模式的阻尼贡献仍然较大；另外，阻尼控制器对等效机 G_8 、 G_9 的阻尼贡献较小，等效机 G_8 、 G_9 参与目标模式振荡的程度也很小，两者相乘，控制器通过等效机 G_8 、 G_9 对目标模式的阻尼会有影响，但影响也较小。阻尼控制器附加在其他通道时的分析

方法也类似。

因此DTA方法能够清晰地表达出阻尼控制器向目标模式提供的阻尼在各台发电机间是如何分配、如何传递以及如何影响振荡模式阻尼，而模态分析方法是直接黑箱操作的方法，只能得到一个计算结果。

将阻尼控制器通过各台发电机对目标模式的阻尼贡献求和，即可得到DTA指标，为了能够有效证明求得的DTA指标的正确性，将DTA计算结果与模态分析法结果进行对比验证，如表2所示。

表2 DTA法和模态分析法结果比较

目标模态	阻尼控制器附加通道	DTA法	模态分析法
$-0.326\ 6+8.907\ 0\ i$	控制直流电压 V_{dc}	$-0.765\ 5+12.381\ 6\ i$	$-0.767\ 5+12.375\ 4\ i$
	控制交流电压 V	$3.377\ 5-34.023\ 9\ i$	$3.375\ 9-34.030\ 7\ i$
	控制无功功率 Q	$3.494\ 7-26.077\ 0\ i$	$3.496\ 6-26.078\ 5\ i$
	控制有功功率 P	$1.991\ 7-2.692\ 6\ i$	$1.989\ 4-2.693\ 0\ i$

从表2可以看到，DTA法和模态分析法数值非常接近，证明了DTA法所求数据的正确性。不难发现，当阻尼控制器附加在控制交流电压 V 的通道上时，DTA指标的数值最大，表明了此时目标模态对阻尼控制器的灵敏度最高，通过阻尼控制器调节目标模态阻尼的效果最显著，因此在该电网加装UPFC阻尼控制器的首选通道应该是控制交流电压 V 的通道。

将设计好的阻尼控制器附加在UPFC的四个通道上进行仿真验证，系统1 s时在MC处发生三相接地短路故障，故障持续时间为0.1 s，仿真曲线如图10所示，图10中功角差为HJ机和JLRJ机之间功角差，由图10可以看到，控制交流电压 V 的通道是附加阻尼控制器的最佳通道，阻尼控制器的阻尼效果最好。

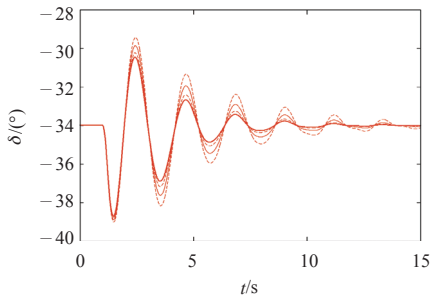


图10 阻尼控制器附加在不同通道时的仿真曲线图

5 结束语

本文以实际电网为研究背景，详细分析了装有UPFC的该电网在各个通道上附加阻尼控制器之后，其对目标模态提供的阻尼是如何在系统中分配的，具体表现为阻尼控制器向每台发电机机电振荡环节提供的阻尼转矩的大小，以及每台发电机参与目标模态振荡的程度如何。最后计算得到了每个通道上的DTA，并与模态分析法结果进行

了对比验证，证明了DTA的正确性，得出了在控制交流电压 V 的通道上附加阻尼控制器时阻尼效果最好。

参考文献

[1] 刘建坤，李群，陈静．基于UPFC的供电能力提升技术及其在江苏电网中的应用[J]．电气应用，2014，33(17)：20-24．

[2] 颜伟，朱继忠，孙洪波，等．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．

[3] Rem B A，Keri A，Schauder C，et al．AEP unified power flow controller performance[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1999，14(4)：1374-1381．

[4] 蔡晖，祁万春，黄俊辉，等．统一潮流控制器在南京西环网的应用[J]．电力建设，2015，36(8)：73-78．

[5] 王旭，祁万春，黄俊辉，等．柔性交流输电技术在江苏电网中的应用[J]．电力建设，2014，35(11)：92-96．

[6] 覃波，李兴源，王大刚，等．利用模态分解法设计的PSS以及TCSC联合抑制系统低频振荡[J]．电气应用，2015，34(17)：34-40．

[7] 宋墩文，杨学涛，丁巧林，等．大规模互联电网低频振荡分析与控制方法综述[J]．电网技术，2011，35(10)：22-28．

[8] 胡晓波，王海风．镇定电力系统多模态振荡的研究[D]．南京：东南大学，2007．

[9] 王海风，李敏，陈珩．统一潮流控制器的多变量控制设计[J]．中国电机工程学报，2000，20(8)：51-55．

(下转第41页)

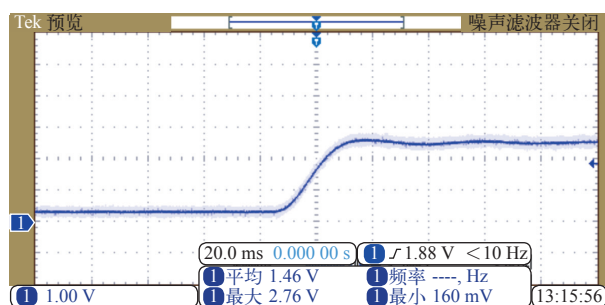


图6 直流充电机500 A恒流输出调节

通过实验得出结果,可以看出设计的直流充电机,在工作中输出响应速度快,无明显超调,稳定后波形平稳、纹波较小。而且能有效减少设备的体积和质量,使装置更具灵活性和可移动性。同时运用高频变压器电压转换技术,能有效提高效率,节约电力资源。

6 结束语

本设计基本达到了预期目的,后期可进行进一步优化,提高其高效性和性价比。由于交流充

电桩不能满足大功率快速充电的需求,随着电动汽车直流充电技术的发展,基于直流母线的快速充电桩、充电站将得到蓬勃发展,本文设计的高频隔离型直流充电机因其体积小、功率密度大、模块化扩展能力强和便携的特点,将具有较好的市场应用前景。

参考文献

- [1] 温家良,傅鹏,刘正之,等.大功率直流晶闸管开关设计及其可靠性分析[J].电力系统自动化,2006,30(5):55-58.
- [2] 黄菊花,丁湘粤,曹铭.集成式车载充电机的研究[J].电源技术,2014,38(12).
- [3] 刘亚丽,李国栋,滕文,等.充电机检测平台及其集成设计[J].电气传动,2015,45(1).
- [4] 李敏裕,马晓军,闫之峰,等.一种推挽全桥双向直流变换器的仿真研究[J].电源技术,2015,39(2).

(收稿日期:2015-12-01) EA

(上接第23页)

- [10] 颜伟,朱继忠,徐国禹.UPFC线性最优控制方式的研究及其对暂态稳定性的改善[J].中国电机工程学报,2000,20(1):45-49.
- [11] 章勇高,康勇,刘黎明,等.统一潮流控制器并联变换器的改进型双环控制系统[J].中国电机工程学报,2007,27(4):40-46.
- [12] 章良栋,岑文辉,刘为.UPFC的模型及控制器研究[J].电力系统自动化,1998,22(1):36-39.
- [13] 谭伟璞,贺仁睦,杨以涵,等.统一潮流控制器的瞬时矢量控制算法[J].电网技术,1999,23(7):10-14.
- [14] Demello F. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control[J]. IEEE Transactions on Power System, 1969, 88(4): 316-329.

- [15] 王宇静,于继来.电力系统非线性振荡模态分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(20):1-5.
- [16] Wang H F. Damping function of unified power flow controller[J]. IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(1): 81-87.
- [17] Wang H F, Swift F J. Application of the controllable series compensator in damping power system oscillations[J]. IEE Proc. Part C, 1996, 143(4): 359-364.
- [18] Swift F J, Wang H F. The connection between modal analysis and electric torque analysis in studying the oscillation stability of multi-machine power systems[J]. Electrical Power and Energy Systems, 1997, 19(5): 321-330.

(收稿日期:2016-01-04) EA