

并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制抑制低频振荡研究

叶慧¹, 吴熙¹, 桂国亮²

(1.东南大学电气工程学院, 江苏南京 210096; 2.安徽省电力科学研究所, 安徽合肥 230601)

摘要:对于互联系统的弱阻尼问题, 可以安装 STATCOM 的附加阻尼控制抑制低频振荡。文中比较不同运行方式下采用几种常用的控制信号时, 传统 STATCOM 附加阻尼控制器阻尼振荡的效果。为避免采用单一控制信号时可能出现的问题, 选取 2 种合适的信号作为输入信号, 设计并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制器。研究表明, 与传统 STATCOM 附加阻尼控制器相比, 并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制器抑制低频振荡效果更佳, 在系统运行方式变化时鲁棒性更强。

关键词: 并联双通道; 不同附加控制信号; STATCOM; 低频振荡

中图分类号: TM76

文献标识码: B

文章编号: 1009-0665(2011)04-0030-04

STATCOM 是一种并联型的无功补偿装置, 是 FACTS(Flexible AC Transmission Systems, 灵活交流输电系统)家族的重要成员, 具有体积小、容量大、响应速度快等优点。STATCOM 通常用来改善动态电压性能, 增强电力系统电压的控制能力^[1,2]。而通过安装 STATCOM 的附加阻尼控制器可以增加系统阻尼, 抑制电力系统低频振荡^[3,4]。但在某些运行条件及系统参数下, 常规的阻尼控制可能失效甚至使 STATCOM 向系统提供负阻尼^[5]。因此, 有必要对 STATCOM 稳定可靠的发挥功能阻尼区域间振荡进行研究。

设计并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制器来抑制低频振荡。首先比较传统的 STATCOM 附加阻尼控制器采用几种常用附加控制信号时抑制区域联络线低频振荡的效果, 判断不同附加控制信号的阻尼特性以及对系统运行状态变化的适应性。针对传统 STATCOM 附加阻尼控制器的负阻尼或阻尼比提升水平不佳问题, 选取 2 种合适的输入信号作为控制信号, 设计并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制器来抑制低频振荡。在四机两区域系统中的仿真结果表明, 相对于传统的 STATCOM 附加阻尼控制, 并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制更好地提升系统阻尼, 在系统运行方式变化的时候鲁棒性会更强。

1 原理

STATCOM 通过向系统提供无功补偿电流从而调整输电线路的无功功率, 维持或改变接入点的电压。将 STATCOM 作为可控的电流源, 这样能较准确地描述 STATCOM^[6]的特性, 同时也可简化 STATCOM 与系统的接口。利用 STATCOM 的附加

阻尼控制, 通过调节输出的无功补偿电流可以实现阻尼控制^[3]。

为简单起见, 选用单机无穷大系统进行数学推导, 并作如下假设: (1) 发电机采用经典二阶模型; (2) 发电机输入机械功率 P_m 恒定; (3) STATCOM 等效为可控无功电流源。系统图及其参数见图 1。

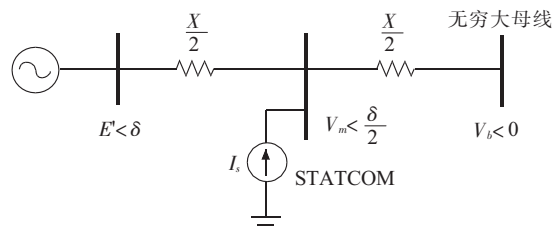


图 1 单机无穷大系统

图 1 中 STATCOM 将中点电压调节到 V_m , 其输出的无功电流为 I_s 。为简单起见, 设 $|E'| = |V_b| = 1$ 。可以求出 STATCOM 接入后发电机输出的电磁功率 P_e , 如:

$$P_e = \frac{1}{2} I_s \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) + \sin\delta \frac{1}{X} \quad (1)$$

在稳态工况及 $\Delta\omega$ 很小时, $\Delta P_e \approx \Delta T_e$, 电磁力矩 ΔT_e 可表示为:

$$\Delta T_e = \frac{\partial P_e}{\partial I_s} \Delta I_s + \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta \quad (2)$$

中点电压在平衡点处展开, 有:

$$\Delta V_m = -\frac{1}{2} \sin \frac{\delta_0}{2} \Delta \delta + \frac{X}{4} \Delta I_s \quad (3)$$

如果 STATCOM 进行纯电压控制且作用足够强, 使得 V_m 为常数, 即 $\Delta V_m = 0$, 则:

$$\Delta I_s = \frac{2}{X} \sin \frac{\delta_0}{2} \Delta \delta \quad (4)$$

代入式(4)可得:

$$\Delta T_e = K_{e1} \Delta \delta \quad (5)$$

式中: $K_{e1} = \frac{\partial P_e}{\partial I_s} \frac{2}{X} \sin \frac{\delta_0}{2} + \frac{\partial P_e}{\partial \delta}$ 。

纯电压控制只能增加与 $\Delta\delta$ 分量相关的同步力矩系数 K_e , 影响振荡频率, 对与 $\Delta\omega$ 分量相关的电气阻尼力矩系数 D_e 没有贡献。

如果允许对输出无功电流 I_s 随 $\Delta\omega$ 变化进行调制便可以对系统阻尼作出贡献。取 $\Delta I_s = K\Delta\omega$, K 为常数。那么电磁力矩可表示为:

$$\Delta T_e = D_{e2}\Delta\omega + K_{e2}\Delta\delta \quad (6)$$

式中: $D_{e2} = K \frac{\partial P_e}{\partial I_s}$; $K_{e2} = \frac{\partial P_e}{\partial \delta}$ 。

对比式(5)和式(6), 可以看到配置 STATCOM 的附加阻尼控制, 对 STATCOM 输出无功电流随 $\Delta\omega$ 变化进行调制后, 使电磁力矩中增加一个和速度增量 $\Delta\omega$ 成比例的正阻尼力矩成分 $D_{e2}\Delta\omega$, 提升了系统抑制低频振荡的能力。以上在单机无穷大系统中对 STATCOM 的附加阻尼控制抑制低频振荡的基本原理进行了推导, 并且做了部分简化假设, 但是同样适用于实际多机系统。

2 STATCOM 不同附加控制信号阻尼效果比较

STATCOM 附加阻尼控制器通过引入反映系统振荡的变量来增加系统阻尼, 选择合适的附加控制信号是影响其阻尼效果的关键因素。一般线路有功功率 P 、线路电流幅值 I_m 、线路有功电流分量 I_a 和区域惯量中心角频率 ω 都可作为 STATCOM 附加阻尼控制的输入信号。且分别采用以上 4 种附加控制信号, 改变系统运行方式, 通过小扰动分析比较采用不同附加控制信号时 STATCOM 附加阻尼控制的阻尼特性。

选择如图 2 所示的四机两区域系统^[7]作为仿真验证系统。STATCOM 安装于两区域联络线的中间母线 bus8 处。

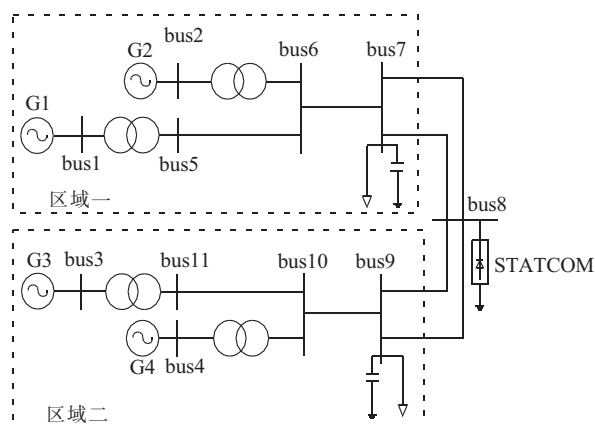


图 2 四机两区域系统

在区域一向区域二输送 200 MW 有功功率的运行方式下, 对考察系统进行小扰动稳定分析, 得到此时该系统的特征根, 如表 1 所示。

表 1 系统低频振荡特征根

序号	低频振荡特征根	频率 / Hz	阻尼比 / %	机电回路相关比
(1)	-0.073 645+ j4.041 469	0.64	1.82	8.66
(2)	-0.142 826+ j8.084 155	1.28	1.7	35.11
(3)	-0.141 089+ j8.106 700	1.29	1.74	36.16

根据特征根的模式结果, 序号(2),(3)振荡模式分别是发电机 1,2 和 3,4 的区域内振荡模式; 而序号(1)则是发电机 1,2 和 3,4 之间的区域间振荡模式。对于区域内振荡模式(2)和(3), 可以通过配置 PSS 来解决。对于区域间振荡模式(1), 则需要利用 STATCOM 的附加阻尼控制进行抑制。STATCOM 附加阻尼控制的传递函数如图 3 所示。

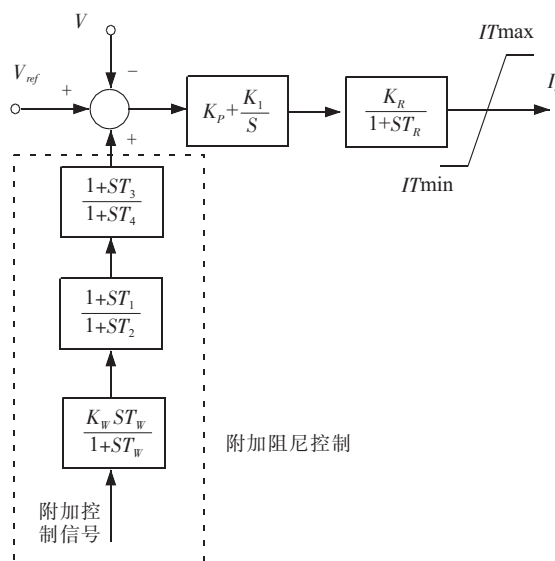


图 3 STATCOM 附加阻尼控制的传递函数

附加控制信号首先通过隔直环节隔直, 然后经过 2 级的超前滞后环节最终调制 STATCOM 的母线注入电流 I_s 。其中部分参数设为 $K_R = 1$, $K_p = 10$, $K_I = 10$, $T_R = 0.02$, $T_w = 5$, $IT_{max} = 3$, $IT_{min} = -3$ 。附加控制器超前滞后环节参数应用相角补偿原理^[8]进行设计, 采用不同附加输入信号时控制器参数并不相同, 具体参数如表 2 所示。

表 2 不同附加输入信号控制器参数

附加输入信号	$T1$	$T2$	K_w
有功功率 P	0.06	0.5	10
线路有功电流分量 I_a	0.2	0.5	2
惯量中心角频率 ω	0.045	0.5	45
线路电流幅值 I_m	0.15	0.5	1

以上参数在特定的运行方式下进行设计, 但是区域联络线传输功率是不断变化的, 甚至可能出现

联络线潮流反向的极端情况。改变系统的运行方式,保持控制器的参数不变,考察不同附加控制信号对各种运行方式的适应性。设置运行方式 1 下区域一向区域二输送 250 MW 有功功率,运行方式 2 下区域一向区域二输送 200 MW 有功功率,运行方式 3 下区域一向区域二输送 100 MW 有功功率,运行方式 4 下区域一向区域二输送 -200 MW 有功功率。4 种运行方式下特征根变化情况如表 3 所示。

表 3 4 种运行方式下区域间振荡模式变化情况

附加控制信号	运行方式 1	运行方式 2	运行方式 3	运行方式 4
P	-0.29+	-0.39+	-0.59+	0.039+
	j3.39	j3.629	j4.15	j3.68
	(8.59%)	(10.6%)	(13.88%)	(-0.82%)
I _a	-0.51+	-0.37+	-0.22+	0.079+
	j3.63	j3.93	j4.25	j4.11
	(13.82%)	(9.48%)	(5.07%)	(-1.94%)
ω	-0.61+	-0.42+	-0.22+	0.24+
	j3.88	j4.10	j4.32	j4.15
	(15.45%)	(10.09%)	(5.05%)	(-5.70%)
I _m	-0.27+	-0.21+	-0.14+	-0.21+
	j3.79	j4.05	j4.31	j4.05
	(6.99%)	(5.15%)	(3.24%)	(5.15%)

注:括号中数据为该特征根对应的阻尼比。

由表 3 可见,系统运行方式变化时,采用同组参数设置,与线路电流有功分量 I_a、惯量中心角频率 ω 相比,线路有功功率 P、线路电流幅值 I_m 阻尼效果变化较小,相对稳定。联络线潮流反向后,仅线路电流幅值 I_m 作为附加控制信号仍能够提供正阻尼。

从易于测量和对运行方式的鲁棒性角度考虑,当联络线潮流正向变化时,有功功率 P 可作为合适的附加控制信号,但对于可能出现的联络线潮流反向这一极端情况,会产生负阻尼作用。线路电流幅值 I_m 为控制信号可避免上述负阻尼问题,但阻尼比提升水平却相对较低。单一的以 P 或 I_m 作为输入信号都有不足之处,设计一种并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制器,联络线潮流正向变化时,将线路的有功功率 P 和线路电流幅值 I_m 同时作为输入信号,更好地提升系统阻尼。线路功率方向判断器判断联络线潮流反向时,切除有功功率 P 的附加阻尼控制通道,避免潮流反向时的负阻尼问题。

3 设计与仿真

并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制数学模型以传统单通道的 STATCOM 附加阻尼控制数学模型为基础,建立 2 个并联的附加阻尼控制通道,如图 4 所示。

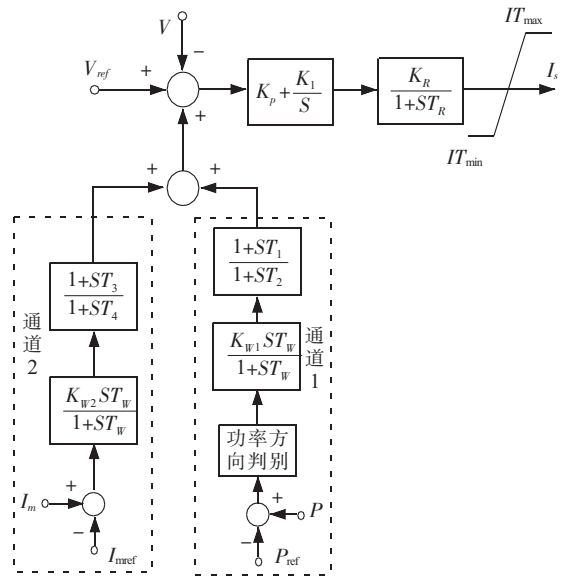


图 4 并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制数学模型

仿真系统仍然使用四机两区域系统。并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制器输入 2 种控制信号,其目标与传统的 STATCOM 附加阻尼控制器一致,都是为了对联络线上的功率振荡能量进行持续的消减。仍然采用相角补偿原理来分别设计 2 个附加阻尼控制通道超前滞后环节的参数,运行方式 2 下参数设置如表 4 所示,通道 1 和通道 2 分别采用有功功率 P 和线路电流幅值 I_m 为控制信号。

表 4 并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制器参数

通道 1	T1=0.06	T2=0.5	K _{w1} =10
通道 2	T3=0.15	T4=0.5	K _{w2} =1

同样的,保持控制器参数不变,改变系统运行方式,对比单通道的 STATCOM 附加阻尼控制和并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制对系统运行方式变化的适应性。4 种运行方式下特征根变化如表 5 所示。

表 5 4 种运行方式下区域间振荡模式变化情况

附加控制信号	运行方式 1	运行方式 2	运行方式 3	运行方式 4
P	-0.29+	-0.39+	-0.59+	+0.04+
	j3.39	j3.629	j4.15	j3.68
	(8.59%)	(10.6%)	(13.88%)	(-0.82%)
I _m	-0.27+	-0.21+	-0.14+	-0.21+
	j3.79	j4.05	j4.31	j4.05
	(6.99%)	(5.15%)	(3.24%)	(5.15%)
P 和 I _m	-0.31+	-0.41+	-0.65+	-0.21+
	j3.33	j3.56	j4.12	j4.05
	(9.42%)	(11.54%)	(15.52%)	(5.15%)

注:括号中数据为该特征根对应的阻尼比。

由表 5 可见,同时将有功功率 P 和线路电流幅值 I_m 作为附加控制信号,联络线功率正向变化时,并联双通道 STATCOM 在阻尼比提升水平高于传统的 STATCOM,对区域间振荡的阻尼效果更佳。运行于联络线功率反向的极端方式时,切除有功功率 P 的附加阻尼控制通道,仅保留线路电流幅值 I_m 的附加阻尼控制通道,避免负阻尼效应的发生。这表明当系统可能出现大范围运行方式时,并联双通道 STATCOM 附加阻尼控制能更好地适应系统运行方式的变化,鲁棒性更强。

4 结束语

系统运行方式变化时,传统的 STATCOM 附加阻尼控制采用单个控制信号可能会导致负阻尼作用或系统阻尼提升水平不佳。相对于传统单通道的 STATCOM 附加阻尼控制,本文设计的双通道并联结构的 STATCOM 附加阻尼控制阻尼比提升水平更高且不会出现负阻尼效果,能够更加稳定可靠地阻尼区域间低频振荡,表现出更强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 栗春,马晓军,姜齐荣,等.用 STATCOM 改善系统电压调节特性的动模实验[J].中国电机工程学报,1999,19(9):46-49.
- [2] RADMAN G, SHULTZ J. A New Method to Account for

STATCOM Losses in Power Flow Analysis System Theory [C].Proceedings of the 35 th IEEE Southeastern Symposium on System Theory, 2003.

- [3] 王文聪,梅生伟,刘峰.区域间联络线上的 STATCOM 的鲁棒控制器设计[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(4):433-437.
- [4] WANG H F. Phillips-Heffron Model of Power System Installed with STATCOM and Application[J]. IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., 1999, 146 (5): 521-527.
- [5] 栗春,姜齐荣,王仲鸿.基于规则的 STATCOM 的控制器设计[J].中国电机工程学报,1999,19(6):56-64.
- [6] CIGRE TF 38-01-06 on Load Flow Control, Load Flow Control in High Voltage Power Systems Using FACTS Controllers [R]. 1996.
- [7] KUNDUR P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill Inc,1993.
- [8] 严伟佳,蒋平.抑制区域间低频振荡的 FACTS 阻尼控制[J].高电压技术,2007,33(1):189-192.

作者简介:

叶 慧(1987-),女,江苏张家港人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行控制;

吴 熙(1987-),男,江苏靖江人,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行控制;

桂国亮(1978-),男,安徽桐城人,硕士研究生,主要从事电网协调、电能质量等方面的研究工作。

Research on the Additional Damping Control of STATCOM with Parallel Double Channel to Restrain Low Frequency Oscillation

YE Hui¹, WU Xi¹, GUI Guo-liang²

(1.School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2.Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China)

Abstract: For the weak interconnected system, it can be solved by installing STATCOM additional damping control to inhibit low frequency oscillation. In the paper, the control effects of traditional STATCOM additional damping control at different operational mode with several common signals were compared and analyzed. In order to avoid the problems may occur due to using signal control signal, two appropriate signals were selected as the input signal to design the additional damping controller of STATCOM with parallel double channel. The results show that, compared with the traditional STATCOM additional damping controller, the additional damping controller of STATCOM with parallel double channel has better effect in restraining low frequency oscillation and has more strong robustness when system operation styles changes.

Key words: parallel double channel; additional damping control; STATCOM; low frequency oscillation

何为电离辐射?

辐射是不依人的意志为转移的客观事物。在人们赖以生存的环境中,辐射无处不在。太阳发出的由核反应的光和热,是人类生存所必需的,天然的放射性物质广泛分布于整个环境中。就连我们的身体内,也存在着 ^{14}C , ^{40}K 以及 ^{210}Po 之类的放射性核素。地球上的所有生命,都是在存在着此类辐射的背景下不断进化而来的。

按照辐射作用于物质时所产生效应的不同,人们将辐射分为电离辐射与非电离辐射两类。电离辐射包括宇宙射线、X 射线和来自放射性物质的辐射。非电离辐射包括紫外线、热辐射、无线电波和微波。