

统一潮流控制器的模糊控制策略设计

王超, 舒乃秋, 吕小静

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 本文建立了UPFC的动态数学模型, 提出了UPFC的模糊控制策略, 并对UPFC的四个调节器分别设计了控制器。文中对UPFC的阻尼控制器进行了改进, 给出了运用带多个因子的模糊规则自调整的模糊控制器。并运用MATLAB的仿真工具, 对含UPFC的双机系统进行了仿真。仿真结果表明, UPFC采用模糊控制后不但能有效地调节线路潮流, 而且能有效地抑制振荡, 提高电力系统的暂态稳定性。

关键词: 统一潮流控制器; 模糊控制; 系统稳定

中图分类号: TM 712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)10-0013-05

1 引言

统一潮流控制器(UPFC)作为灵活交流输电系统(FACTS)装置中最具代表性的一员, 它通过对三个系统参数(电压、相角和阻抗)的调整, 可实现系统有功功率和无功功率的准确调节, 还可提供多种补偿功能, 提高线路的输送能力, 减小系统振荡, 提高电力系统的暂态稳定性。所以UPFC从一问世起就倍受关注。

统一潮流控制器含有两个电压逆变器(VSI), 并通过直流储能电容相连。串联侧逆变器通过向输电线注入一幅值和相位可调的可控电压, 来控制线路的有功功率和无功功率。并联侧逆变器除了满足串联侧逆变器的有功需求外, 还可为线路提供无功补偿。在两个VSI间有功功率可以自由流动, 两个逆变器也可以在自己的交流输出端独立地吸收或发出无功功率。UPFC要实现其多种功能, 主要依靠控制器。

近年来, 有关UPFC控制器的研究非常活跃, 文献[1, 2]设计了PI控制器; 文献[3]对其中的参数给出了非线性控制策略; 文献[4, 5]在引入模糊控制抑制系统振荡方面进行了探讨。模糊控制的最大优点是有不依赖于被控对象的精确数学模型, 能够克服非线性因素的影响, 对调节对象的参数变化具有较强的鲁棒性, 使之在电力系统领域中也得到了广泛应用。本文将模糊控制策略用于UPFC的控制器设计中, 并对该设计进行了仿真, 仿真结果表明所设计的控制器具有有效性和正确性。

2 UPFC的数学模型

图1为含UPFC线路的等效电路。其中 n_1, X_{T1}

和 n_2, X_{T2} 分别为变压器 T_1, T_2 的变比和等效电抗; m_1, φ 和 m_2, φ 分别为并联侧逆变器、串联侧逆变器的交直流电压比和触发角。逆变器的控制方式采用正弦脉宽调制(SPWM), 可以明显降低输出电压的谐波含量。稳态时, 忽略UPFC装置的自身损耗, UPFC的并联部分从系统吸收的有功功率 P_1 与串联部分输出到系统的有功功率 P_2 在数值上是相等的, 即 $P_1 = P_2$ 。但在动态过程中, P_1, P_2 , 反映在储能电容 C 上的电压是变化的。在这里, 直流量采用有名值, 交流量采用标么值。 V_B, S_B 为系统基准值。这样电容 C 的动态表达式为:

$$C \frac{dV_C}{dt} V_C = (P_1 - P_2) S_B \quad (1)$$

式中 $P_1 = \text{Re} \left[V_1 \left(\frac{n_1 V_S - V_1}{jX_{T1}} \right)^* \right]$

$$P_2 = \text{Re} \left[V_{pq} \left(\frac{V_S + V_{pq} - V_T}{jX_{T2}} \right)^* \right]$$

(P_1, P_2 的表达式见文献[2])

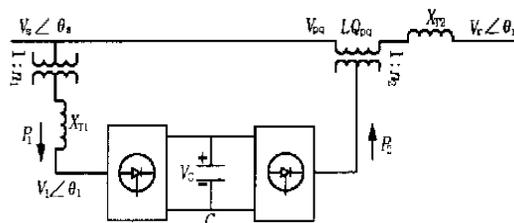


图1 UPFC及其安装线路的等效电路

Fig 1 Equivalent circuit for transmission line with UPFC installed

逆变器的交直流两侧的电压关系可以表示为:

$$\begin{cases} V_1 = m_1 V_C / V_B \\ V_{pq} = m_2 V_C / n_2 V_B \end{cases} \quad (2)$$

根据电压矢量法的原理, V_1, V_{pq} 的相角 θ, θ_{pq}

可由两个逆变器的触发角 φ_1 、 φ_2 和 V_s 的相角 θ 来决定, 关系表达式为:

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta - \varphi_1 \\ \theta_2 = \theta - \varphi_2 \end{cases} \quad (3)$$

综合式(1)~(3)即得UPFC的数学模型, 控制系统通过改变UPFC的控制参数 m_1 、 φ_1 、 m_2 和 φ_2 来达到控制目标。

3 UPFC的模糊控制

UPFC的控制目标是要保持所接线路的有功和无功为给定值 P_{ref} 、 Q_{ref} , 也要保持所接入点母线电压和直流电容电压为给定值 V_{sref} 、 V_{cref} 。通常采用的控制方式是通过调节 θ 来使 V_c 恒定为给定值, 调节 m_1 来控制并联侧无功功率 Q_1 (或节点电压 V_s), 而串联侧 θ_1 和 m_2 则完全由线路潮流 P 、 Q 的需要来调节。常规的控制系统的框图见文献[5]。由于常规PI调节器的参数很难设计得使UPFC既有快的响应速度, 又有较小的超调量, 特别在网络拓扑结构发生变化时, PI调节的局限性更加突出。而模糊控制能够克服PI控制的缺陷, 因此运用模糊控制设计UPFC的控制器成为必要。

3.1 模糊控制器的原理

建立模糊模型的方法, 除通过经验得到控制规则外, 还有两种常用的方法, 即模糊推理合成法和修正因子法。这里我们采用修正因子法, 应用修正因子法建立的模糊模型易于调整, 工作量小。模糊模型结构采用的解析表达式为:

$$U = \alpha E + (1 - \alpha)C \quad (4)$$

式中 $\alpha \in [0, 1]$ 是修正因子, 偏差 E 为 $(R - Y)$, R 为系统的给定值, Y 为系统的实际输出值, 偏差变化率 $C(k) = E(k) - E(k-1)$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) 为离散时间变量。

通过调整修正因子 α 的值, 可得到不同特性的模糊模型。带修正因子的模糊模型不仅易于灵活调整控制规则 (α 决定了偏差 E 和偏差变化 C 的权重系数, 具有鲜明的物理意义), 而且克服了单凭经验确定控制规则的缺陷, 特别有利于通过解析方法分析、设计模糊控制器。

为满足系统在不同条件下对修正因子的不同要求, 式(4)的模糊模型还可引入多个修正因子, 如:

$$U = \begin{cases} \alpha_1 E + (1 - \alpha_1)C & (E = 0, \pm 1) \\ \alpha_2 E + (1 - \alpha_2)C & (E = \pm 2, \pm 3) \end{cases} \quad (5)$$

随着修正因子数目的增加, 控制系统的阶跃响应特性随之改善, 若凭经验确定上述参数会带有一

定的盲目性, 很难获得一组最佳数据。为此, 可采用ITAE (误差绝对值时间积分) 积分性能指标: $J =$

$$\int_{t_1}^{t_2} |e(t)| dt$$

其中: t_1 、 t_2 分别为阶跃响应的开始时刻和进入稳态的时刻。 J 表示误差函数加权时间后的积分面积大小。以性能指标 J 为目标函数, 根据 $J \rightarrow \min$ 的原则, 采用梯度法^[6]对参数寻优, 最终可获得一组优选的修正因子。

3.2 UPFC并联侧的模糊控制

对电容电压采用可调整参数的模糊PD控制器, 通过控制 θ , 可影响和改变直流电容充放电过程。控制框图如图2所示。

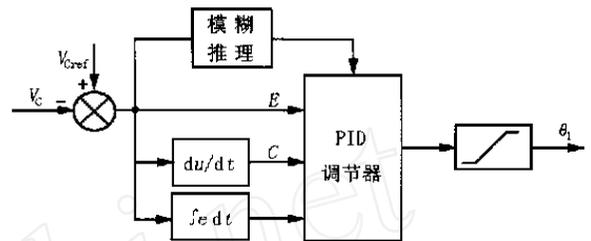


图2 UPFC并联侧电容电压的模糊PD控制框图

Fig 2 Fuzzy PD control of on UPFC parallel side capacitance voltage

模糊控制的解析表达式为:

$$\begin{cases} U = K_3 E + (1 - K_3)C + K_1/s \\ \theta = K_2 U \end{cases} \quad (6)$$

式中: $E = V_{cref} - V_c$, $C = s(V_{cref} - V_c)$, U 为控制量, K_1 、 K_2 、 K_3 为量化因子。

并联侧无功功率的控制, 与串联侧的两个控制器的耦合较弱, 相互影响小, 而与直流电容电压控制器联系较强, 我们仍采用常规的PI控制器, 控制框图如图3所示。

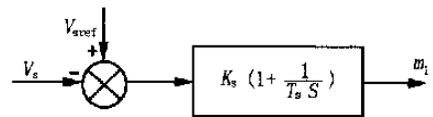


图3 UPFC并联侧无功功率控制框图

Fig 3 Block diagram of on UPFC parallel side reactive power

3.3 UPFC串联侧的模糊控制

对串联侧的控制, 本文采用了两个模糊控制器, 即有功功率模糊控制器和无功功率模糊控制器, 分别对应控制参数 θ_1 和 m_2 。控制框图如图4所示。

两个模糊控制器的输入输出论域均为 {正大 (PB), 正中 (PM), 零 (ZE), 负中 (NM), 负大 (NB)}。隶属度函数均采用图5所示的三角形函数。

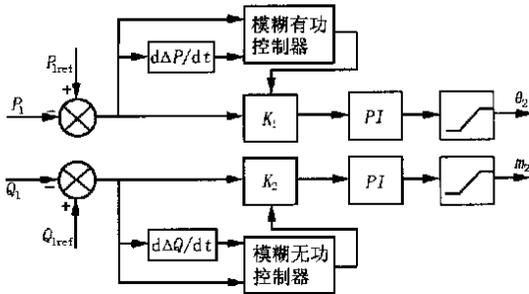


图 4 UPFC 串联侧的模糊控制框图

Fig 4 Fuzzy control of UPFC series side

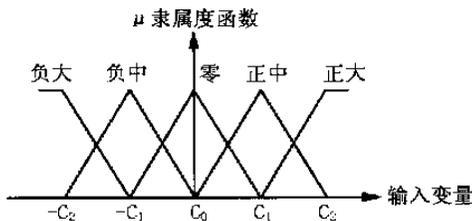


图 5 隶属度函数

Fig 5 Grade of membership

两个模糊控制器输入输出的尺度变换采用线性尺度变换, 模糊推理采用 Mamdani^[6]的最小运算规则, 清晰化采用加权平均法。

控制规则如表 1。

表 1 控制规则

Tab 1 Control rule

偏差 / 偏差的导数	偏差				
	NB	NM	ZE	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	ZE
NM	NB	NB	NM	ZE	PM
ZE	NB	NM	ZE	PM	PB
PM	NM	ZE	PM	PB	PB
PB	ZE	PM	PB	PB	PB

3.4 UPFC 的阻尼模糊控制

在系统中加入类似于 PSS 的阻尼控制器, 可抑制系统振荡^[2]。但由于比例调节依赖于所在的工作点, 不能在很宽的区间内提供适当的抑制信号, 当工作点变化时, 比例调节器难以满足有效的调节特性。鉴于此, 本文设计了一种阻尼模糊控制器。

模糊控制器的输入输出的论域均为 {正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大}。经过线性变换后, 输入输出的论域变为 {3, 2, 1, 0, -1, -2, -3}。

设输入信号的偏差为 E , 偏差变化率为 C , 则带多个修正因子的模糊控制规则表示为:

$$U = \begin{cases} \alpha_0 E + (1 - \alpha_0) C & (E = 0) \\ \alpha_1 E + (1 - \alpha_1) C & (E = \pm 1) \\ \alpha_2 E + (1 - \alpha_2) C & (E = \pm 2) \\ \alpha_3 E + (1 - \alpha_3) C & (E = \pm 3) \end{cases} \quad (7)$$

根据目标函数最小原则, 运用梯度法对参数寻优。图 6 为其原理图。它的输入为线路的有功功率, 输出放大后送入 UPFC 的主控制中。

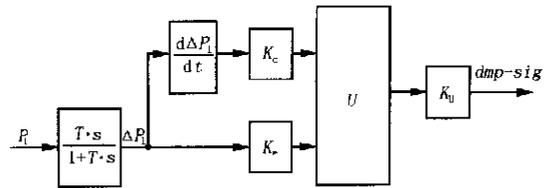


图 6 阻尼模糊控制器原理图

Fig 6 Principle of damp fuzzy controller

4 仿真结果及分析

仿真实线图如图 7 所示的双机系统。UPFC 安装在 I 回线的中间。发电机采用次暂态模型, 负荷为恒阻抗模型。系统参数见附录。

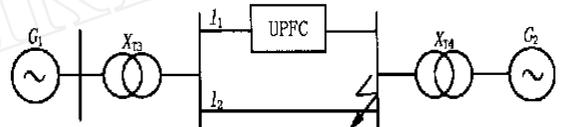


图 7 含 UPFC 的两机仿真系统

Fig 7 2-generator simulation system with UPFC

(1) 系统给定: 在 $t = 1$ s 前, $V_c = 400$ V, $P_1 = 10$ kW, $Q_1 = 10$ kvar, $Q_{shu} = 5$ kvar; 在 $t = 1$ s 时给定, $P_1 = 15$ kW, $Q_1 = 15$ kvar, $Q_{shu} = 5$ kvar, 其余给定不变; 在 $t = 1.4$ s 时给定 $P_L = 10$ kW, $Q_L = 15$ kvar, $Q_{shunt} = 5$ kvar。此时线路的有功功率、无功功率、并联侧无功功率以及直流侧电容电压曲线如图 8 所示。

图 8 的仿真结果表明: 当 UPFC 采用模糊控制后, 在不同的潮流下, UPFC 的控制效果都很好。并联侧的无功波动很小, 时间很短, 直流电容电压的响应时间也很短。

(2) 对 UPFC 的暂态过程进行仿真。系统参数同前。

假设 $t = 10$ s, II 回线末端发生三相短路, 经过 0.1 s 后故障切除。运用梯度法对式 (7) 中的参数寻优。取 $\alpha_0 = 0$, $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.2$, $\alpha_3 = 0.6$, $K_c = 0.4$, $K_u = 1.6$, $K_a = 0.8$ 。发电机 1 的转速曲线如图 9 所示。

由图 9 的结果可知, UPFC 采用阻尼模糊控制

时,能提高电力系统的暂态稳定性,对比UPFC采用线性阻尼控制时,发电机的第一摆最大值有所减小,恢复稳态所用的时间短,这说明其性能优于UPFC的线性阻尼控制。由于采用了修正因子法,避免了常规模糊推理的计算量大的缺点,实时修正模糊控制输入量的最大值、最小值,使模糊控制器能适应不同的扰动情况。

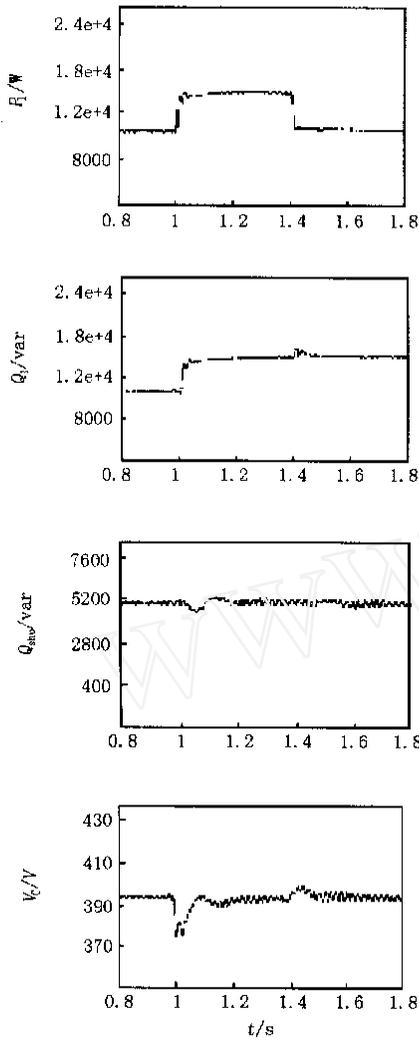


图8 线路有功、无功、并联侧无功及电容电压响应曲线

Fig 8 Curves of P_1, Q_1, Q_{shu} and V_c

4 结论

本文建立了UPFC的动态数学模型,给出了UPFC的模糊控制策略。采用修正因子法,对仿真参数进行寻优。提出了采用阻尼模糊控制器来抑制电力系统振荡的方法。运用MATLAB的仿真工具对含UPFC的双机系统进行了仿真,结果证明了UPFC采用模糊控制的有效性和控制器设计的正确性。

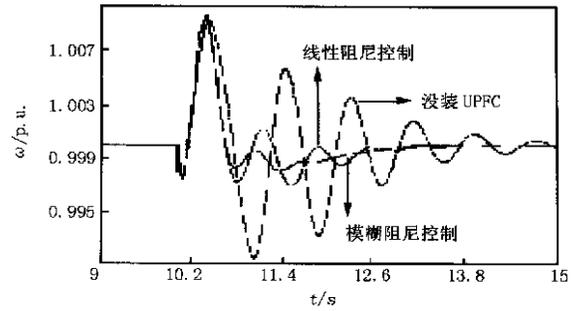


图9 发电机1的转速曲线

Fig 9 Rotor curve of generator 1

对大扰动的情况也进行了仿真分析,结果表明UPFC能有效地抑制振荡,提高电力系统的暂态稳定性。在UPFC从理论向实际应用逐步发展的过程中,模糊控制策略也将会有其广阔的应用前景。

附录:

UPFC的参数为:

$V_B = 220 \text{ kV}, S_B = 100 \text{ MVA}, n_1 = n_2 = 0.05, X_{T1} = 0.001, X_{T2} = 0.0015, X_{11} = X_{12} = 0.5, X_{T3} = X_{T4} = 0.1, G_1, G_2: P = 700 \text{ MW}, Q = 500 \text{ M var}, x_d = 1.8, x'_d = 0.15, x_q = 1.7, x''_q = 0.3, T'_{d0} = 4.1, T''_{d0} = 0.03, T''_{q0} = 0.04$

参考文献:

- [1] Padiyar K R, Uma Ruo K. Modeling and control of unified power flow controller for transient stability[J]. Electrical power and energy systems, 1999, 21: 1-11.
- [2] 黄振宇,等. 统一潮流控制器的控制系统分析及控制策略设计[J]. 电网技术, 1999, 23(7): 3-8.
- [3] 谢桦,等. 统一潮流控制器的非线性控制和对电力系统稳定性的改善[J]. 电力系统自动化, 2001, (19): 1-4.
- [4] Schoder K, Hasanovic A, et al. Power system damping using fuzzy controlled unified power flow controller[A]. Power engineering society winter meeting [C]. IEEE, 2001: 617-622.
- [5] 付立军. 统一潮流控制器的控制及其对电力系统稳定的作用[D]. 武汉大学博士学位论文. 2002.
- [6] 诸静,等. 模糊控制原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

收稿日期: 2003-06-26

作者简介:

王超(1976-),男,硕士研究生,研究方向为灵活电力系统。

舒乃秋(1954-),男,教授,主要从事电力系统在线监测的研究;

吕小静(1980-),女,硕士研究生,研究方向为电力电子及数字信号处理。

Fuzzy control strategy design of unified power flow controller

Wang Chao, Shu Nai-qiu, Lü Xiao-jing

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract UPFC mathematic model is built up and the fuzzy control strategy of UPFC is proposed. To four controlling variables, this paper also respectively designs four controllers. Furthermore, the damping controller is improved by means of applying fuzzy control rule to it. Finally, the 2-generator with UPFC is simulated by MATLAB tools. As a result, UPFC with fuzzy controller can effectively adjust real and reactive power of transmission and damp oscillation during transient conditions.

Key words UPFC; fuzzy control; transient stability

新疆新能许继自动化有限责任公司

新能许继自动化有限责任公司是由新疆知名企业集团——新能集团与国内知名的最大电力装备制造企业许继集团有限公司合作组建的新兴高科技企业。公司以“团结、进取、创新、发展”为企业精神,以积极的人才培养与产品开发为核心,主要从事变电站、发电厂的继电保护及自动化控制设备、调度自动化、配网自动化的设计、生产与销售及变压器、高低压开关(柜)等电力一次设备和电梯等民用机电产品的销售。公司组建半年以来发展迅猛,为进一步拓宽经营领域,实现产业化,成为西北最具实力的电气装备制造企业,现向社会诚聘:

★系统工程师(5人)

学历:本科以上 专业:计算机应用
 工作内容:电力调度自动化主站系统、变电站自动化后台系统的构筑安装、维护和培训。
 素质要求:熟悉计算机、电力系统,从事过相关工作。

★软件工程师(10人)

学历:本科以上 专业:计算机软件、计算机应用
 工作内容:工业嵌入式计算机系统应用产品软件设计
 素质要求:有较好的硬件基础和计算机软件开发经验,熟悉RTOS或其他嵌入式系统开发平台。

★硬件工程师(10人)

学历:本科以上 专业:电力系统自动化、电子或计算机
 工作内容:电力系统自动化装置硬件开发设计
 素质要求:熟悉单片机或DSP应用技术并有相关工作经验,能熟练应用Protel辅助设计软件。

★工程技术服务工程师(10人)

学历:本科 专业:电气工程、电力系统自动化
 工作内容:技术方案设计、标书编写、技术支持、售后服务
 素质要求:具备较强的电力行业专业基础知识,服务意识强,语言文字表达能力强,善于与人沟通,有较强的协调能力。

★销售经理(5人)

学历:大专以上 专业:电力系统自动化、电气工程、市场营销
 工作内容:市场开拓
 素质要求:熟悉电力产品市场,具备较强的沟通能力,刻苦敬业,能独立开展业务工作,可长期出差,有对客户跟进、对手跟踪,情报收集及分析等相关工作能力。

本广告长期有效

地址:新疆乌鲁木齐市昆明路6号 邮编:830011 电话:(0991) 8752038 传真:(0991) 8738007
<http://www.xjgc.com> E-mail:xjxnxj@xjgc.com 联系人:黄小姐、朱小姐

更正

《继电器》杂志第九期《国家继电器质量监督检验中心最新型式检验公告(2003年9月)》中的南京安能电气控制有限公司有误,更正为南京安能电气控制设备有限公司。特此更正。

国家继电器质量监督检验中心

2003年10月8日