

基于 TCSC 非线性 PID 控制策略^①

张国军, 饶熊舟, 付衍彬, 马 路

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

摘 要: 通过研究设计一种基于非线性 PID 控制^[1]的可控串联补偿系统, 其不依赖于被控对象的模型特点, 能够弥补传统线性 PID 控制^[2]的诸多不足. 研究表明: 与传统的基于线性 PID 控制的串补系统相比较, 基于非线性 PID 控制的可控串补技术, 由于在反馈中充分利用了非线性组合的功能, 增强了系统的阻尼、改善了系统的暂态稳定性, 同时系统的适应性及鲁棒性也有所提高.

关键词: 非线性 PID; 可控串联补偿系统; 非线性组合; 暂态稳定性

TCSC Nonlinear PID Control Strategy System

ZHANG Guo-Jun, RAO Xiong-Zhou, FU Yan-Bin, MA Lu

(Electric Control College, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: Through the study design based on a nonlinear PID control the controlled series compensation system, which does not rely on the characteristics of the controlled object model, to make up for the traditional linear PID control some shortcomings. The results of the study show that: with the traditional PID control based on linear fixed series compensation system in comparison, based on nonlinear PID control controllable series compensation technology, because in the feedback of the nonlinear combination to make full use of the function, strengthen the system damping, improve the system of the transient stability, and the system robustness and adaptability of has also improved.

Key word: nonlinear PID; controllable series compensation system; nonlinear combination; transient stability

1 引言

在我国, 输电线路安装串联电容补偿装置的历史可以追溯到上世纪五六十年代. 尽管当时我国的电力行业还处在初步阶段, 电网输送电压低, 结构单一, 稳定性和安全性都比较差, 系统采取了串联电容补偿装置以后, 有效的改善了电网的运行参数, 提高了线路的电压水平和输送能力.

改革开放三十年来, 随着科学技术的突飞猛进, 我国电力行业也得到了空前的大发展. 与此同时, 串联电容器补偿(简称串补)技术也在不断的改进更新, 安全性和可靠性都在不断提高. 其主要体现在以下两个方面: 一是串补电容器采取了全新的介质材料, 不但减小了电容器的体积, 同时还提高了系统的运行可靠性. 二是串补电容的过电压保护全面

采用金属氧化物限压器(MOV), 使串补在暂态过程中的作用能更好的发挥出来, 系统的安全性大大提高. 电力电子技术快速发展的同时, 也给串补技术灌注了新的血液. 在原有串联电容补偿的基础之上, 采用电力电子新技术使固定的串联补偿变为可控串联电容补偿, 这不仅提高了远距离高压架空线路的输电容量, 同时也使得系统的动态性能大幅度提高. 可以说可控串补技术是常规串补技术与电力电子的结合.

本文针对可控串补系统的稳定性, 研究并提出了一种基于非线性 PID 的控制策略. 论文先建立系统结构模型, 再着重分析非线性 PID 控制策略的设计原理和主要功能. 最后进行仿真计算, 从而验证基于非线性 PID 控制策略的可靠性.

^① 收稿时间:2012-01-02;收到修改稿时间:2012-09-10

2 系统结构模型及原理

2.1 系统结构模型

本文就某 500KV 超高压输电网络(如图 1 所示)为背景. 该系统位于发电厂的一侧拥有 2 台 500MW 和 2 台 600MW 的火电机组, 电厂发出的电能通过 500KV 超高压线路输送给 380 公里外的某一地区电网. 由于该系统原有的两回交流线路的输送能力已不能满足发电厂侧满发电的要求, 为了保证电厂侧电能的送出, 提高系统的暂态稳定性, 抑制次同步谐振^[3], 需要在双回线路上加装固定串补及可控串补装置.

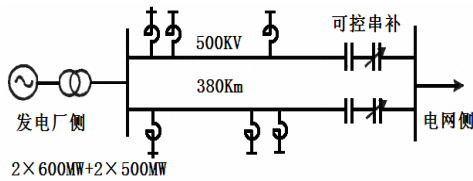


图 1 某一 500kV 超高压输电网络

系统的可控串补装置的一次主回路如图 2^[4]所示, 主要元件有: 电容器组 C、旁路电抗器 L、两个方向并联晶闸管 SCR、保护用的金属氧化物限压器 MOV、旁路断路器 B 及其阻尼电感 L_B 、电阻 R_B 等.

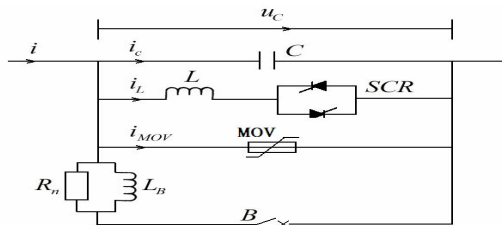


图 2 单相 TCSC 模块主电路结构图

2.2 非线性 PID 控制策略的基本原理

常规的 PID 控制策略虽然应用广泛, 但是一旦被控对象变化范围很大或者非线性较强的时候就存在很多局限性. 这些问题的存在使得经典的线性 PID 很难满足控制系统的要求. 非线性 PID 控制策略是针对经典 PID 在实践中存在的不足, 利用非线性跟踪-微分器将 PID 三路信号进行非线性配置. 在理论上, 非线性 PID 具有较好的不依赖被控对象模型的特点, 因此其应用范围比较广泛, 事实证明其各方面性能均能令人满意. 非线性 PID 控制策略保留了经典线性 PID 的易于实现、结构简单、系统鲁棒性强等优势, 同时利用先进的计算机控制技术针对线性 PID 存在的问题进行改造.

2.3 非线性 PID 控制装置的结构模型

设计非线性 PID 控制器的结构模型如图 3 所示, 其调节原理为: 利用被控量(系统输出量)和参考输入量的误差及其微分、积分的非线性组合来产生控制信号, 利用非线性特性改善系统的稳态误差及暂态过程.

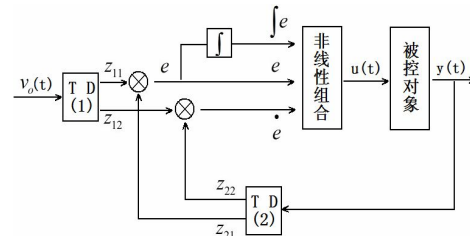


图 3 非线性 PID 控制装置的结构模型

在这里, $v_o(t)$ 为系统的参考输入电压值, $u(t)$ 、 $y(t)$ 分别为系统的输入值和输出值, e 、 $\int e$ 、 \dot{e} 分别为误差、误差的积分、误差的微分:

$$\begin{cases} e = z_{11} - z_{21} \\ \int e = \int_0^t (z_{11} - z_{21}) dt \\ \dot{e} = z_{12} - z_{22} \end{cases} \quad (1)$$

对于参考输入和输出被控制量信号构造出适当的基本要素: e 、 $\int e$ 、 \dot{e} , 并利用这些基本要素的非线性组合来产生控制量.

跟踪-微分器 TD(1)的主要作用是安排理想的过渡过程 $Z_{11}(t)$, 并给出理想过程的微分信号 $Z_{12}(t)$, 其中的参数 R_1 需要根据过渡过程的快慢要求而定. 跟踪-微分器 TD(2)的主要作用是尽快复原 $y(t)$ 并给出其近似微分, 因此参数 R_2 通常取得要比参数 R_1 大. 基本要素 e 、 $\int e$ 、 \dot{e} 的组合形式采用了最接近线性组合的下述形式:

$$u(t) = \beta_p \text{fla}(e, \alpha, \delta) + \beta_d \text{fla}(\dot{e}, \alpha, \delta) + \beta_i \text{fla}(\int e, \alpha, \delta) \quad (2)$$

其中,

$$\text{fla}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ e / \delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (3)$$

$\text{fla}(e, \alpha, \delta)$ 是一种可显示大范围的非线性特征的函数, 用来配置 PID 信号构成控制器.

微分信号可由上述的跟踪-微分器获得. 利用两个跟踪-微分器就解决了传统的线性 PID 控制装置中微分信号不易提取的问题.

基本元素 e 、 $\int e$ 、 \dot{e} 的非线性组合是为了解决线性

组合带来的超调和快速之间的种种矛盾. 确定非线性组合的一个标准原则是: 和小误差时宜采用较大的增益控制, 大误差时宜采用较小的增益控制. 在这里, 非线性 PID 控制系统的参数仅仅取决于被控制对象的结构. 控制系统方程可表述为:

$$\begin{cases}
 \dot{z}_{11} = z_{12} \\
 \dot{z}_{12} = -R_1 \text{sat}(z_{11} - v_o(t) + z_{12} |z_{12}| / (2R_1), \delta_1) \\
 \dot{z}_{21} = z_{22} \\
 \dot{z}_{22} = -R_2 \text{sat}(z_{21} - y(t) + z_{22} |z_{22}| / (2R_2), \delta_2) \\
 e = z_{11} - z_{21} \\
 \dot{e} = z_{12} - z_{22} \\
 \int e = \int_0^t (z_{11} - z_{21}) dt \\
 u = \beta_p \text{fal}(e, \alpha, \delta) + \beta_D \text{fla}(\dot{e}, \alpha, \delta) \\
 + \beta_I \text{fla}(\int e, \alpha, \delta)
 \end{cases} \quad (4)$$

2.4 可控串补系统非线性 PID 控制策略

利用非线性 PID 控制对被控系统的细节无过多要求的特点, 研究设计本 TCSC 非线性 PID 控制系统. 可控串补系统非线性 PID 控制策略的设计仅利用系统的输入参考量和输出被调量即可构造出 3 个基本元素: e 、 $\int e$ 、 \dot{e} , 并利用这些基本元素的非线性组合来产生实际控制量. 与可控串补自抗扰控制策略的不同是, 该系统完全不依赖于被控系统的实际物理模型, 同时与被控系统的阶数和控制变量及其放大倍数也无关. 系统积分的作用相当于补偿系统的外部扰动.

为了控制 ΔP_e , 将参考输入量选为零, 参考输入量的跟踪-微分器 TD(1)可以被省略. 又由于所选择的输出为 ΔP_e 的积分, $y(t)$ 的微分可以直接获得, 输出的跟踪-微分器 TD(2)也可以省略. 因而可以得出更为简单的控制方程:

$$\begin{cases}
 e = -y \\
 u = \beta_1 \text{fla}(e, \alpha_1, \delta_1) + \beta_2 \text{fla}(\dot{e}, \alpha_2, \delta_2) + \beta_3 (\int e, \alpha_3, \delta_3) \\
 u(t - T_c) = X_c
 \end{cases} \quad (5)$$

y 为系统的输出, $u(t)$ 为系统实际受控制对象的控制量, X_c 为具有时间常数 T_c 的可控串补的输出, fal 为一类非线性函数, ΔP_e 可直接获得, α 、 β 、 δ 为系统选定的合适参数. TCSC 系统非线性 PID 控制逻辑结构如图 4 所示:

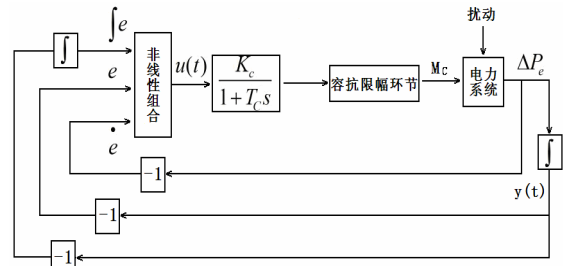


图 4 TCSC 系统非线性 PID 控制逻辑结构

3 实验仿真及结果分析

图 5 是针对图 1 所示 500KV 超高压输电网络构造的 TCSC 系统等值电路图:

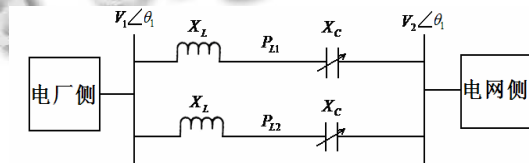


图 5 装有 TCSC 的系统等值电路图

3.1 实验仿真条件

针对上述 500KV 超高压输电系统应用 PSASP/UIP 平台^[5,6] 分别进行线性 PID(LPID) 和非线性 PID (NLPID) 数字仿真. 这里我们设置整个系统的扰动方式为双回中的一回为三相永久故障: ①设置 0.1s 发生三相短路故障; ②设置 0.2s 三相故障线路被切除. 假设 M_{c0} 为扰动设置之前处于稳态时的系统串联在线路中的电容值. 设置系统非线性 PID 控制参数为:

$$\begin{cases}
 \alpha_p = \alpha_I = \alpha_D = 1.25000 \\
 \delta_p = \delta_I = \delta_D = 0.00045 \\
 \beta_p = 0.02200 \\
 \beta_I = 0.00020 \\
 \beta_D = 0.00400
 \end{cases} \quad (6)$$

3.2 实验仿真及结果

下面分别给出 4 种情况下(A、B、C、D)系统受相同扰动后采用具有暂态稳定控制回路的 TCSC 线性 PID 控制与 TCSC 非线性 PID 控制的电厂侧发电机功角、电网侧母线的电压曲线. 其仿真波形输出见图 6-9 所示:

A.总输送功率 198 万 KW, M_{c0} 为 -0.022p.u. , 故障点在电厂侧;

B.总输送功率 198 万 KW, M_{c0} 为 -0.015p.u. , 故障点在电网侧;

C.总输送功率 142 万 KW, M_{c0} 为 -0.010p.u. , 故障点在电厂侧;

D.总输送功率 142 万 KW, M_{c0} 为 -0.010p.u. , 故障点在电网侧;

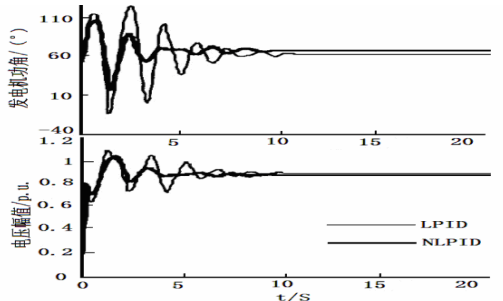


图 6 总输送功率(198 万 KW), M_{c0} (-0.022p.u.), 故障点(电厂侧)

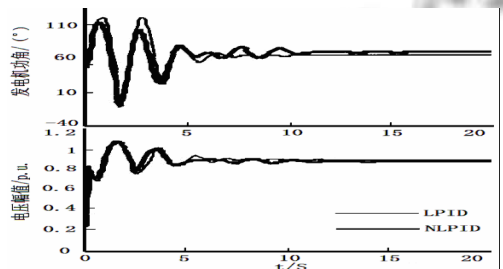


图 7 总输送功率(198 万 KW), M_{c0} (-0.015p.u.), 故障点(电网侧)

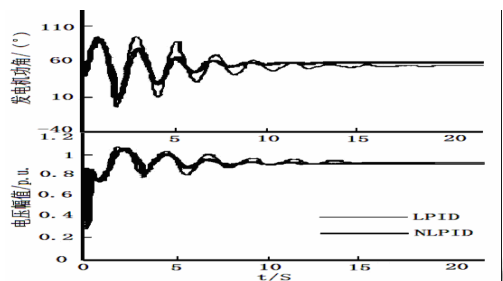


图 8 总输送功率(142 万 KW), M_{c0} (-0.010p.u.), 故障点(电厂侧)

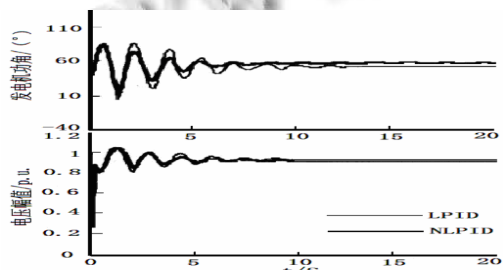


图 9 总输送功率(142 万 KW), M_{c0} (-0.010p.u.), 故障点(电网侧)

3.3 实验结果及分析

从以上曲线可以很明显的看出: 与具有暂态稳定控制回路的 TCSC 线性 PID(LPID)控制相比, 基于 TCSC 非线性 PID 控制系统由于在反馈中利用了非线性性的功能, 不但增强了系统的阻尼、改善了系统的暂态和动态特性, 同时系统的适应性及鲁棒性也增强了。由此可见, 非线性 PID 组合的大范围调节, 能使控制回路按照系统的偏差实现自然调节, 从而克服了线性 PID 组合小范围调节带来的局限性。该仿真结果能充分说明非线性 PID 控制的优点。

4 结论

本文将不依赖于被控系统具体参数的非线性 PID 控制策略应用于可控串补系统的稳定性控制。设计的控制器应用的非线性反馈律是一个动态反馈补偿律, 该补偿律永远可以满足实现性条件, 因而使得控制器的结构变得较为简单, 只需采用较少的、易于采集的现场信号便能实现其在工程上的广泛应用。

数字仿真表明, TCSC 非线性 PID 控制由于在反馈中充分利用了非线性性的功能, 应用于该系统非线性组合的大范围调节, 使控制回路能够按照被控系统的偏差实现自然调节, 从而克服了线性组合小范围调节带来的局限性。所设计的控制系统, 由于所选信号是与线路功率有关的变量或线路功率, 使得容抗补偿跟随功率摆动而变化, 按抑制功率摇摆调制其等值阻抗, 具有较高阻尼能力、稳定性和鲁棒性。

参考文献

- 1 韩京清.非线性 PID 控制器.自动化学报,1994,(3).
- 2 苏玉鑫,段宝岩.一种新型非线性控制器.控制与决策,2003, 18(1).
- 3 郑旭.基于反馈线性化的 TCSC 非线性 PID 控制.电力自动化设备,2006,26(9).
- 4 姚伟,杨毅,孙海顺,等.可控串联电容补偿动态模拟实验装置设计.电力自动化设备,2007,27(12).
- 5 韩京清.一种新型控制器--NLPID.控制与决策,1994,(6).
- 6 Cao YJ, Wu QH, Jiang L, et al. Nonlinear control of power system multi-mode oscillations. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1998,20(1).