

基于网络局部暂态能量的 TCSC 控制策略的研究

蔡国伟¹, 程浩忠², K W Chan³

(1. 东北电力学院, 吉林 132012; 2. 上海交通大学, 上海 200030; 3. 香港理工大学, 香港特别行政区)

摘要: 大扰动下可控硅串联补偿装置控制策略的易实现性、对系统运行方式、故障状态、网络结构的适应性等问题是可控硅串联补偿装置能否实用化的关键。基于结构保持的多机系统的拓扑能量函数, 在探索了系统故障后暂态势能在网络中的分布变化特点基础上, 提出大扰动下仅依赖于本地输入信号的 TCSC (可控硅控制串联补偿) 的控制规律, 不仅控制规律简单易行, 而且在实际系统中的仿真结果表明了该控制规律的有效性。

关键词: 电力系统; 暂态稳定; 可控硅控制串联补偿; 控制策略; 局部暂态能量

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1004-9649(2003)04-0004-04

0 引言

近年来, 随着大功率电力电子技术的发展, FACTS 技术成为实现电力系统暂态稳定控制的新的技术手段。作为 FACTS 家族中的重要一员, TCSC 对系统的暂态过程和事故后的恢复具有快速、灵活的调节能力, 有助于改善电力系统的安全稳定水平^[1], 因此 TCSC 控制策略的研究是一个十分活跃的研究方向^[2-4]。在对 TCSC 的控制规律进行研究时需面对的主要问题是: 如何保证控制规律对系统故障状态、运行状态及网络结构变化的适应性; 如何使 TCSC 的控制策略在工程上易实现。文献^[5]提出基于当地可测变量的 TCSC 的控制规律, 以全系统暂态势能的时间导数小于零为控制目标, 提出在忽略电压变化的影响下, 根据 TCSC 所在支路的两端相角差的余弦的时间导数为开关函数的 bang-bang 控制规律。

本文从网络局部暂态势能的角度研究 TCSC 的控制规律, 通过对系统故障扰动后的暂态能量在网络中分布特性的分析, 基于尽可能减小网络中关键输电环节暂态能量的冲击为目标, 提出以当地的 (Local) 可测变量为输入信号的 TCSC 的控制规律。

1 暂态能量的分布特性

1.1 系统模型

对于一个 m 台发电机、 n^0 个母线、 l^0 条输电线路

的电力系统, 如果在网络中计及发电机内节点, 网络可增广成 $n^0+m=n$ 个节点和 $l^0+m=l$ 支路的增广网络。

若连接支路 k 的两端节点 i, j 的电压相角记为 δ_i, δ_j , 支路 k 的两端相角差可表示为 $\sigma_k = \delta_i - \delta_j$ 。在忽略阻尼的情况下, 多机系统结构保持的拓扑李亚普诺夫函数模型可描述为^[6]:

$$V = V_{KE} + V_{PE} = \frac{1}{2} \sum_{g=1}^m M_g \omega_g^2 + \sum_{k=1}^l \int_{\sigma_k^s}^{\sigma_k} [P_k(u) - P_k^s] du \quad (1)$$

式中 V 表示系统的总能量; V_{KE} 表示系统的总的动能; V_{PE} 表示系统的总的势能; M_g 为第 g 台发电机的转动惯量; ω_g 为第 g 台发电机的角速度; σ_k 为第 k 条支路相角差; σ_k^s 为第 k 条支路在故障后平衡状态下的相角差; $P_k(\sigma_k)$ 为第 k 条支路有功潮流; $P_k(\sigma_k^s)$ 为第 k 条支路在相对于故障后平衡状态下的有功潮流。

对于网络中的任意支路 k , 该支路的势能可表示为:

$$V_{PEk}(\sigma_k) = \int_{\sigma_k^s}^{\sigma_k} [P_k(u) - P_k^s] du \quad (2)$$

如果将支路 k 在故障切除时刻的相角差记为 σ_k^c , 则 $V_{PEk}(\sigma_k^c)$ 为故障切除时刻该支路的势能, 式(2)可表示为:

$$V_{PEk}(\sigma_k) = \int_{\sigma_k^s}^{\sigma_k} [P_k(u) - P_k^s] du + V_{PEk}(\sigma_k^c, \sigma_k^s) \quad (3)$$

式中 $V_{PEk}(\sigma_k^c, \sigma_k^s)$ 为支路 k 在故障切除时刻 (σ_k^c)

收稿日期: 2002-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59977001)

作者简介: 蔡国伟 (1968-), 男, 吉林市人, 工学博士, 从事电力系统稳定与控制研究。

与故障后稳定状态下(σ_k^s)的势能增量。

由于势能的计算依赖于路径的积分,因此路径上不同位置的势能增量与势能的参考点的值无关。故障后支路势能的变化可视为以故障切除时刻支路势能为参考,则支路 k 沿故障后轨迹的势能可表示为:

$$V_{PEk}(\sigma_k) = \int_{\sigma_k^s}^{\sigma_k} [P_k(u) - P_k^s] du \quad (4)$$

1.2 暂态能量在网络中的分布特性描述

文献[7]对故障后暂态能量在网络中的分布特性进行了研究与分析,从对单机系统的仿真研究结果可见,沿着系统故障后的轨迹,系统的总能量是守恒的,在系统暂态过程中其动能和总势能进行等量交换,其中势能可表示为增广网络中所有支路暂态势能的总和。在能量交换过程中,当系统稳定时各支路暂态势能的变化范围在一个有界的域内,但各支路暂态势能变化的幅值并不相同。延长故障持续时间使得系统失去稳定时,系统运行同步被破坏,“撕开”为 2 部分,此时随着发电机转速的不断增大,动能增加,与其进行等量交换的系统的总势能反向增大,并由网络中的各个支路分担。但各支路的暂态势能并不是亦步亦趋地呈现出相同的变化态势,而是其中只有支路 2-3 主要承担总势能的持续增大,与系统动能一样不再有界,相反其他支路的能量变化仍局限在一个有界的域内,由此表明由节点 G、1、2 组成的子系统 A 内部是稳定的,同样由节点 3、S 组成的子系统 B 内部也是稳定的,而子系统 A 与 B 则失去同步,与此相对应连接 A、B 子系统的输电环节上支路 2-3 的暂态势能在达到最大值后大幅度持续下降。随着系统稳定性的逐步恶化,暂态能量将越来越多地集中于网络中的某一个局部输电环节,最终在该环节处网络被撕裂为 2 部分,系统失去稳定性。因此尽可能抑制网络中关键输电环节的暂态势能的变化幅度将有助于提高系统的稳定性,本文的控制规律主要源于该思路。

2 TCSC 控制策略的研究

2.1 TCSC 数学模型

如图 1 所示,TCSC 装设在支路 k , x_k 为支路 k 的电抗, x_{TCSC} 为 TCSC 的容抗。

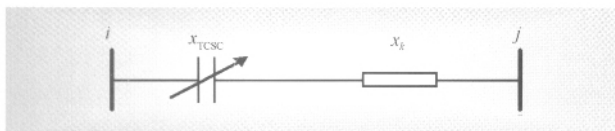


图 1 TCSC 的示意

TCSC 的作用可表示成附加电流注入的形式,其等值电路如图 2 所示。

改变 TCSC 的电抗值,将影响网络节点的注入

电流的大小,并由此通过改变各发电机的电磁功率影响系统的机电暂态过程。

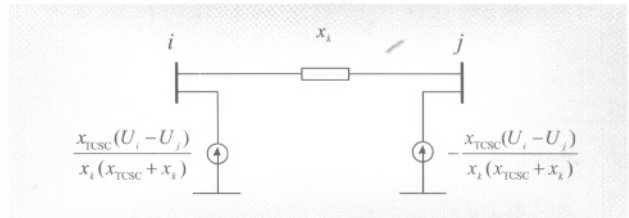


图 2 TCSC 的等值电路

2.2 TCSC 的控制规律

由于抑制局部暂态势能的变化能有效地改善暂态稳定,下面采用图解的方法提出以减小局部暂态势能的变化为控制目标的 TCSC 的控制规律。图 3 为装设 TCSC 的支路 k 的有功功率 $P_k(\sigma_k)$ 相对于 σ_k 的变化曲线。

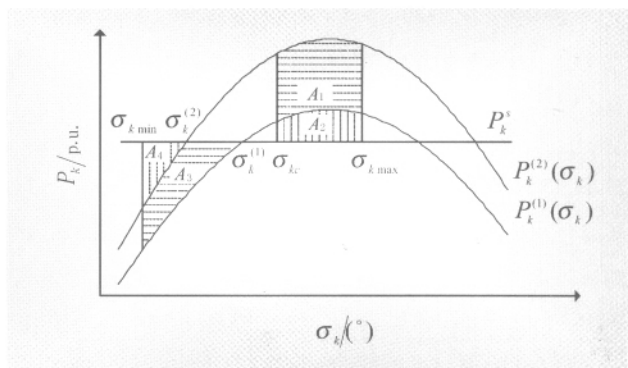


图 3 TCSC 控制规律的示意

图 3 中, $P_k^{(1)}(\sigma_k)$ 为无 TCSC 补偿时的支路 k 的有功功率变化曲线; $P_k^{(2)}(\sigma_k)$ 为 TCSC 补偿度最大时的支路 k 的有功功率变化曲线; P_k^s 为系统稳态情况下的有功功率值; σ_{kc} 为故障切除时刻支路 k 的两端相角差; σ_{kmax} 为支路 k 的两端相角差第 1 次达到的极大值; $\sigma_k^{(1)}$ 、 $\sigma_k^{(2)}$ 分别为 $P_k^{(1)}(\sigma_k)$ 、 $P_k^{(2)}(\sigma_k)$ 与 P_k^s 相等时支路 k 的两端相角差; σ_{kmin} 为支路 k 的两端相角差第 1 次达到的极小值。

t_c 时刻故障切除后,暂态势能将分布于网络各支路中,支路 k 的暂态势能在故障切除后开始增大,在系统两端发电机转子差第 1 次增大的过程中,减小支路电抗,网络中主干支路 k 的两端相角差第 1 次达到的极大值 σ_{km} 也随之减小。因此,故障切除后,支路相角差 σ_k 单调增大的过程中,即有 $d\sigma_k/dt > 0$ 时,TCSC 投入且补偿度最大,将最大限度减小支路 k 的电抗参数,此时支路 k 的有功功率的运行轨迹为 $P_k^{(2)}(\sigma_k)$,在达到 σ_{km} 时,其暂态势能的大小为

图3中 A_1 、 A_2 的面积和。

在支路 k 的两端相角差达到其极大值时,如果TCSC无补偿,支路 k 的有功功率的运行轨迹为由 $P_k^{(2)}(\sigma_k)$ 变化为 $P_k^{(1)}(\sigma_k)$ 。在 σ_k 减小,即 $d\sigma_k/dt < 0$ 的过程中,支路 k 的暂态势能在由 σ_{km} 至 $P_k^{(1)}(\sigma_k)$ 与 P_k^s 的交点处的 σ_{ak}^1 的变化过程中,其值由 A_1 、 A_2 的面积和变化为 A_2 。

在 σ_k 由 $\sigma_{ak}^{(1)}$ 继续减小的过程中,有 $d\sigma_k/dt < 0$,若TCSC为无补偿时,可限制 σ_k 反向摆动的幅值,在此过程中,支路 k 的暂态势能为图3中所示的 A_3 、 A_4 的面积和。

在 σ_k 达到其极小值的时刻,即 σ_k 变化至 σ_{kmin} 时,若控制TCSC为最大补偿度,则支路 k 的有功功率的运行轨迹为由 $P_k^{(1)}(\sigma_k)$ 变化为 $P_k^{(2)}(\sigma_k)$,在 σ_k 由 σ_{kmin} 变化至 $\sigma_{ak}^{(2)}$,即 $d\sigma_k/dt > 0$ 的过程中,支路 k 的暂态势能为图3中所示的面积 A_4 。

可见,在 σ_k 随时间 t 变化的过程中,若有 $\frac{d\sigma_k}{dt} > 0$,控制TCSC达到其最大补偿度;反之,在 $\frac{d\sigma_k}{dt} < 0$ 的过程中控制TCSC无补偿,如此可显著地减小TCSC所在支路的暂态势能的变化幅度,将有效地改善系统暂态稳定性的提高。这一思路可推广到其它FACTS控制器,如可控移相器(TCPS)、统一潮流控制器(UPFC)的控制规律的设计中。

因此TCSC的控制规律可概括为:

$$\begin{cases} \text{如果 } \frac{d\sigma_k}{dt} \geq 0, \text{ 则: } x_{TCSC} = x_{Cmax} \\ \text{如果 } \frac{d\sigma_k}{dt} < 0, \text{ 则: } x_{TCSC} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)所示的控制规律的输入信号仅为当地的可测变量,且独立于系统的运行方式、故障状态及网络的拓扑结构。

3 仿真结果

通过图4所示的实际多机系统的仿真算例说明本文提出的TCSC的控制规律的有效性。

若TCSC装置装设于割集{YMC-FTB}的输电电路上,假设扰动为母线YMC、FTB间双回输电线路之一发生三相短路故障,0.1s切除故障线路。为便于比较,图5给出在无TCSC补偿、TCSC采用文献[5]的控制规律及采用本文的控制规律这3种情况下,1号发电机与等值系统1间的摇摆曲线。图5中的曲线表明,TCSC采用文献[5]的控制规律和采用本文的控制规律均对第一摆的暂态稳定性的改善产

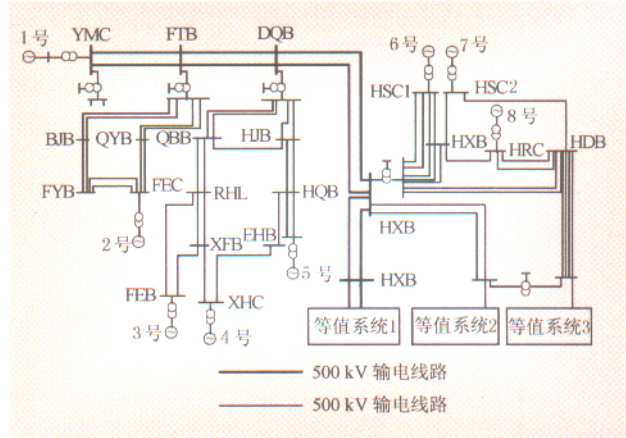


图4 实际多机电力系统

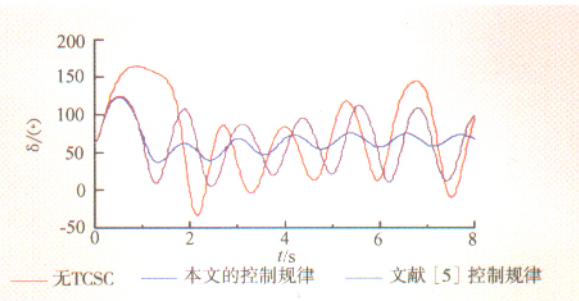


图5 1号发电机与等值系统1间的摇摆曲线

生明显的作用,但比较而言,TCSC应用本文的控制规律时对系统后续振荡具有更强的抑制效果。其原因是虽然文献[5]所给出的控制规律是在以控制全系统暂态能量的大小随时间减小的基础上推导出的,但其实质是通过直接改变网络局部暂态势能的变化,进而实现对全系统暂态能量变化的影响。但由于在其开关函数中包含了支路 k 的有功功率的方向的作用项,因此若在动态过程中支路 k 的有功功率方向发生变化时,TCSC将产生使支路 k 的暂态势能增大的控制作用,故其控制规律对后续振荡的阻尼效果并非理想。

4 结论

本文提出基于网络局部暂态能量的以提高系统暂态稳定性的TCSC的控制规律,该控制规律的思路是通过抑制网络局部暂态能量的变化改善系统大扰动下发电机的第一摆及后续摆的稳定性,基于该控制规律设计的控制器的输入信号完全建立在本地可测变量的基础上,而且控制规律简单,便于工程实现,而且对系统的运行方式及故障状态等变化具有较好的适应性。根据网络局部能量的观点,可进一步应用现代控制理论的方法设计效果更理想的TCSC的控制策略。

参考文献：

- [1] IEEE Working Group on Special Stability Control. Bibliography on the application of discrete supplementary control to improve power system stability[J]. IEEE Trans on PWRD, 1987, 2(2): 474-485.
- [2] S S Choi, F Jiang, G Shrestha. Suppression of transmission system oscillations by thyristor-controlled series compensation[J]. IEE Proceeding Generation Transmission Distribution, 1996, 143(1): 7-12.
- [3] 郭强, 吕世荣, 刘晓鹏, 等. 用于提高暂态稳定性的可控串联补偿非线性控制器[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 40-42.
- [4] Zhang Cai, Zhou Xianzhong, Yu Jiang, *et al.* Co-ordinated nonlinear control of TCSC and SVC in power systems[A]. Beijing: POWERCON, 1998: 338-341.
- [5] M Noroozian, L Angquist, M Ghandhari, *et al.* Improving power system dynamic by series-connected FACTS devices[J]. IEEE Trans on PWRD, 1997, 12(4): 1635-1641.
- [6] A R Bergen, D J Hill. A structure preserving model for power system stability analysis [J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100(1): 25-35.
- [7] 蔡国伟, 穆钢, 程浩忠, 等. 基于支路暂态势能和两端电压识别临界机群的新方法[J]. 中国电力, 2002, 35(5): 40-44.

(责任编辑 李博)

The TCSC control strategy based on local network transient energy

G W Cai¹, H Z Cheng², K W Chan³

(1. Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China; 2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 3. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China)

Abstract: The availability and adaptability to operation mode, disturbance and network configuration, and good ability to coordinate with other controllers are main problems for TCSC controller in practical use. Based on the topological transient energy function, the novel TCSC control strategy is presented according to the distributing features of transient energy over network after the removal of large disturbance, which is very simple and take the local variables as input signals. The simulation result on real multi-machines power system testifies its validity.

Key words: power system; transient stability; TCSC; control strategy; local transient energy

下期要目

中国电力
下期要目

电力与经济

2002年全国电力可靠性统计分析
我国电力弹性系数的现实意义

电力系统

2002年全国电网安全运行情况分析
2002年上半年全国电网继电保护运行情况分析
具有大型核电站的电力系统的安全策略和措施
自耦联络变压器区域化保护配置研讨

发电技术

固体颗粒对汽轮机通流部分的冲蚀与防治对策
汽轮机低压转子与发电机转子联轴器上的缺陷分析
660 MW 机组防结渣的燃烧器改造和运行调整
低合金钢主蒸汽管蠕变激活能与寿命过程的研究
130 t/h 循环流化床锅炉达不到设计蒸发量的原因分析

及对策

可调水平淡煤粉燃烧器在耒阳电厂 670 t/h 锅炉上的应用

输配电

500 kV 紧凑型线路带电作业用保护间隙
天广可控硅控制串联补偿暂态稳定及次同步谐振初步研究

电力自动化

上海电网火电机组 2002 年度热控保护动作概况及分析
火电厂热控专业安全性评价情况分析
规范化管理是提高火电厂分散控制系统可用性和可靠性的有效途径
基于模糊推理的电厂设备通用型故障诊断系统研究

电力信息化

山东电力信息网络安全规划及实施

应用技术

10 kV 小电阻接地系统运行分析与评价
电厂地下管线的可视化管理系统