TCSC过电压保护方式研究

冯 宇[1], 陈士军[2], 陈 奎[1], 唐 轶[1]

(1.中国矿业大学信电学院,江苏 徐州 221008; 2.武汉大学电力学院,湖北 武汉 430072)

摘要: TCSC的过电压保护主要研究故障情况下保护TCSC和MOV的方式以及如何降低MOV能耗水平,以满足经济性要求,同时又有利于系统暂态稳定。在分析TCSC过电压保护方式与暂态稳定关系的基础上,提出过电压保护的控制策略,研究了保护性旁路的启动方式,并借助ARENE软件予以仿真验证。

关键词: 过电压保护; 能耗; 启动方式; ARENE仿真

中图分类号: TM862 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2004)18-0029-04

0 引言

我国的煤炭和水电资源主要集中在中西部地区,而电力消费则集中在东部地区。能源分布和经济发展之间的不平衡决定了我国电力工业有必要实施长距离、大容量的西电东送战略。可控串联电容补偿装置(Thyristor Controlled Series Compensation, TCSC)可在原有电网结构下,起到提高电网传输能力、保证系统暂态稳定、调节线路潮流、抑制次同步谐振等作用。TCSC实用化的一个关键性技术就是其过电压保护问题,它主要研究故障情况下保护TCSC和MOV的方式以及如何降低MOV能耗水平,以满足经济性要求,同时又有利于系统暂态稳定。本文在分析TCSC过电压保护方式与暂态稳定关系的基础上,提出过电压保护的控制策略,研究了保护性旁路的启动方式,并借助ARENE软件予以仿真验证。

1 TCSC的过电压保护方式

1.1 TCSC的工作模式

图1是TCSC的电路原理图。它通过控制晶闸管触发角α,改变通过电抗器的电流值,从而改变TCSC的等值阻抗,达到控制的目的。

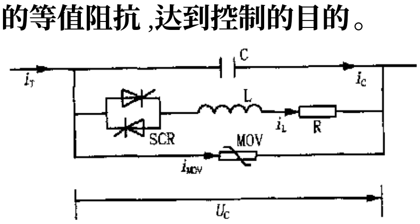


图1 TCSC电路原理图

Fig.1 Circuit of TCSC

TCSC有3种典型的运行模式[2]:

1) 晶闸管闭锁模式,$\alpha = 180°$,相当于只有电容器串接在系统中。

2) 连续调节模式,TCSC通常运行在这个容性范围内。

3) 旁路模式,晶闸管处于全导通状态,$\alpha = 90°$,相当于L与C的并联。此时TCSC呈现小感抗状态,可在系统故障期间抑制短路电流、减轻MOV的负担。

1.2 旁路模式的作用和特点

当系统发生短路故障时,将会有很大的电流流过TCSC装置,在其电容器上产生很高的过电压。此时,MOV会吸收大部分电流,起到限制电容器上过电压,保护电容器的作用。当MOV负载达到一定水平时,则起动旁路模式,使与电容回路并联的电感回路全投入,减轻MOV能量吸收负担。就是说,旁路模式起到了保护MOV的作用。

另外,采用这种模式可减轻MOV的负担使得在选择MOV设备时减少了投资,因为保护水平越高,投资也就越大。

1.3 TCSC的过电压保护方式

TCSC过电压保护的核心问题是:在内外部故障情况下如何对TCSC实行旁路(TCSC的控制触发角为90°)工作模式。其保护方式主要有两种[1]:

1) 内部故障和外部故障均旁路。

2) 内部故障旁路而外部故障不旁路。

发生内部故障时,首先启动旁路工作方式,以减轻MOV能耗负担;待故障切除后,立刻将TCSC调节到最大等效容抗以保证系统暂态稳定,即所谓的强补;随后调节TCSC的补偿度使之与系统的功率摇摆相协调,阻尼后续功率振荡。对于内部故障采用旁路方式已经成为工程界的共识。其优点是显著的。

对于外部故障是否需要旁路的问题,一直存在

着不同的看法:如果优先保证系统暂态稳定,则应该采取不旁路的工作模式,待故障切除后,马上调至强补状态,进而过渡到阻尼后续功率振荡。但是,这种过电压保护方式要求 MOV 的保护水平和允许能耗较高。如果采取外部故障旁路的工作模式,当故障切除后,系统摇摆或调节过冲很容易再次启动保护性旁路,而旁路的误触发将会破坏系统的暂态稳定控制。所以对于外部故障旁路与否的问题,主要取决于系统暂态稳定性和经济性的优先性问题。

可见实现过电压保护和系统暂态稳定是互相矛盾的。在实际系统中,应该综合考虑这两个因素,在短时旁路后尽快进行强补,提高暂态稳定极限。

2 TCSC 的过电压保护控制策略

本文针对过电压保护和系统暂态稳定间互相矛盾的问题,提出如图 2 所示的过电压保护控制系统,主要包括以下几个部分:

1) 过电压保护控制回路。根据旁路启动判据决定 TCSC 是否进入旁路工作模式。可采用的旁路启动判据主要有:MOV 的电压、电流、能耗以及能耗梯度等[1,2]。

2) 暂态稳定控制回路。包括暂态稳定控制和阻尼振荡控制。其作用是快速调节容抗,使系统具有良好的动态稳定特性,应与过电压保护控制相协调。

3) 容抗限制回路。其作用是计及 MOV 过电压保护对容抗的调节限制,同时对 MOV 的过电压进行限幅,使容抗在 TCSC 允许的工作能力范围内调节。

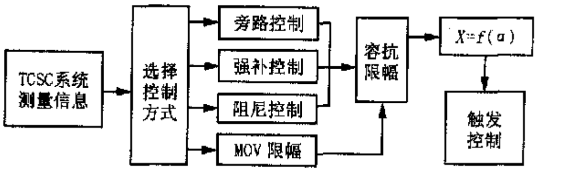


图 2 TCSC 过电压保护控制策略

Fig. 2 Control strategy of TCSC over-voltage protection

3 TCSC 旁路性保护的启动方式

3.1 能耗启动方式

能耗启动方式的控制回路如图 3 所示,该种方式判断 MOV 能耗值与整定值之间的大小关系,如果 MOV 能耗值大于等于整定值,就启动旁路模式。采用能耗启动方式的原因是:能耗可较好地反映施加在 MOV 上的电压、电流和持续时间的关系。确定启动能耗的原则是:在正常运行、单回线运行以及暂态稳定调节过程及其它非故障性扰动时,不应启

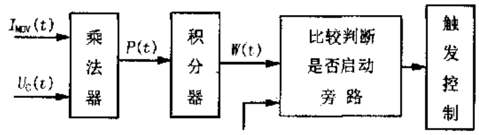


图 3 能耗启动方式的控制回路

Fig. 3 Control loop of energy consumption start mode

动旁路,同时应考虑将过电压和 MOV 能耗水平限制在一个合理的范围内。启动能耗的大小应根据过电压保护方式来确定。

但是由于能耗反映的是一种累积效应,所以在实际应用中,能耗启动方式存在两个问题:

1) 不易协调好系统暂态稳定和经济性之间的矛盾。可采用降低启动能耗(提高经济性)并同时在故障切除后闭锁旁路控制回路(保证系统暂态稳定性)的方法来解决这一矛盾。

2) 启动能耗的门槛值难以确定。因为在整定该门槛值时需要考虑系统运行方式变化、短路过程随机性因素影响、外部故障切除后的摇摆过程中 MOV 能耗的随机性变化等许多情况。

所以,在确定能耗启动门槛值时需要进行大量的仿真实验,同时考虑随机过程的统计规律。

3.2 能耗梯度启动方式[2]

为彻底解决故障切除后阻尼振荡过程中由于能耗变化而引起的误触发旁路问题,不妨采用能耗梯度启动方式。这是因为故障切除后的功率摇摆基本上是个平稳过程,所以能耗梯度在此过程中的变化不会太大,并且在数值上低于故障状态下的能耗梯度。

能耗梯度启动方式的控制回路如图 4 所示,该种方式判断 MOV 能耗梯度值与整定值之间的大小关系,如果 MOV 能耗梯度大于等于整定值,就启动旁路。确定启动能耗梯度的原则是:在正常运行、单回线运行以及暂态稳定调节过程及其它非故障性扰动时,不应启动旁路,同时应考虑将过电压和 MOV 能耗水平限制在一个合理的范围内。其优点是克服了能耗启动方式下的故障切除后的旁路误触发问题,并且降低了 MOV 的能耗、提高了投资的经济性,旁路生效时间比能耗启动方式短,有利于暂态稳

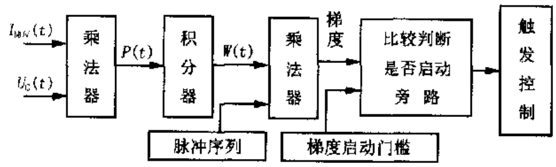


图 4 能耗梯度启动方式的控制回路

Fig. 4 Control loop of energy consumption gradient start mode

定。具有较好的应用前景。

另外,还可以用 MOV 电流启动 TCSC 的旁路工作模式。

4　ARENE 仿真结果及分析

4.1　ARENE 软件简介[3]

ARENE 是由法国电力公司(EDF)开发的电力系统数字仿真软件,可进行电力系统的潮流计算、短路计算及稳定性校验等。它是由 EDF 发展而来的电网数字暂态分析器。其功能强大,元件库器件丰富。与其它电力系统分析软件,如 PSASP,EMPT 等相比较,它的特殊功能是网络化仿真,可与硬件配合使用,对电气设备实现在线实时监测等。

4.2　仿真结果与分析

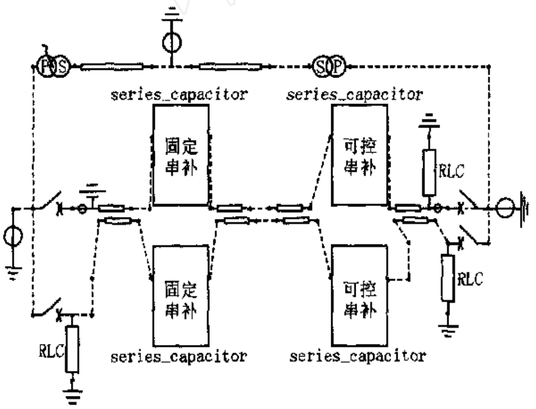


图 5　多机仿真系统

Fig. 5　Simulation system of multi-machine

表 1　两种过电压保护方式的能耗水平与旁路时延

Tab. 1　Energy consumption and bypass delay of two over-voltage protection modes

故障类型	内、外部故障均旁路		内部故障旁路而外部故障不旁路	
	最大能耗值/MJ	平均旁路时延/ms	最大能耗值/MJ	平均旁路时延/ms
内部单相	0.318	4.33	3.031	4.2
内部三相	0.456	3.88	3.2	2
外部单相	0.305	4.5	1.18	不旁路
外部三相	0.439	4.1	2.626	不旁路

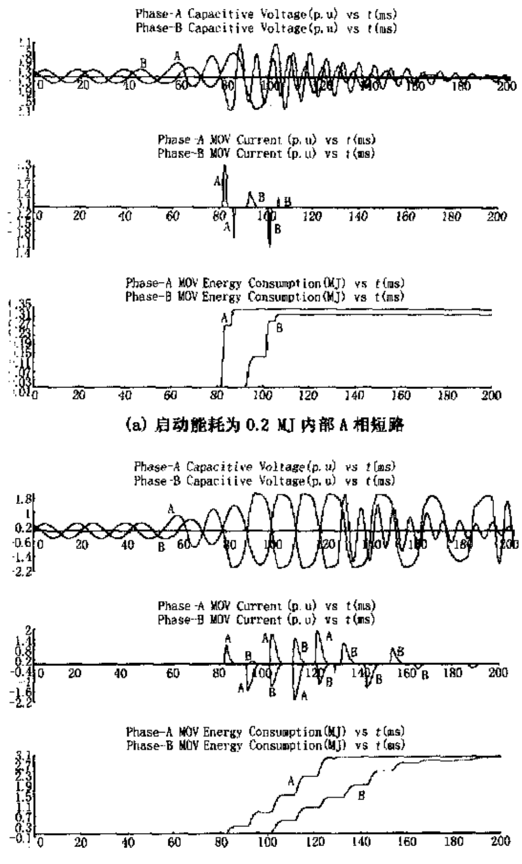
本文以图 5 所示的某 3 机 7 线路 500 kV 可控串补系统为例进行研究。经仿真分析得知,当采用能耗启动方式时,如果采用内、外部故障均旁路的过电压保护方式,启动能耗为 0.2 MJ;如果采用内部故障旁路而外部故障不旁路的过电压保护方式,则启动能耗为 3.0 MJ。表 1 给出了两种过电压保护方式下的能耗水平与旁路时延数据。图 6 给出了不同过电压保护方式下内部 A 相短路的仿真波形图。

由仿真结果可知:

1) MOV 过电压保护动作造成 MOV 电流和能耗的急剧上升。在实现了保护性旁路后,电容电压和 MOV 电流减小,能耗不再增加,TCSC 旁路起到了限流和限压作用。

2) 单相接地故障时故障相的能耗增长明显快于非故障相,因此故障相先进入旁路。

3) 旁路的启动能耗与短路过程 MOV 能耗的实际水平有一定的差距。图 6(a)中旁路触发时 MOV 能耗为 0.2 MJ;完全旁路时,MOV 能耗达到 0.318 MJ,这是因为在旁路生效时延时段内,MOV 的能耗增加较快。



(a) 启动能耗为 0.2 MJ 内部 A 相短路

(b) 启动能耗为 3.0 MJ 内部 A 相短路

图 6　不同过电压保护方式下的仿真波形

Fig. 6　Simulation results in different modes of over-voltage protection

表 2 给出了两种旁路启动方式下发生故障的能耗水平与旁路时延数据。图 7 给出了能耗梯度启动方式的仿真波形图。

由仿真结果可知:

1) 与能耗启动旁路相比,使用能耗梯度启动方式,使内部故障的触发旁路时间提前。能耗水平接近内外部故障都旁路方式的能耗水平。这说明能耗梯度启动方式在内部故障时能耗较低。

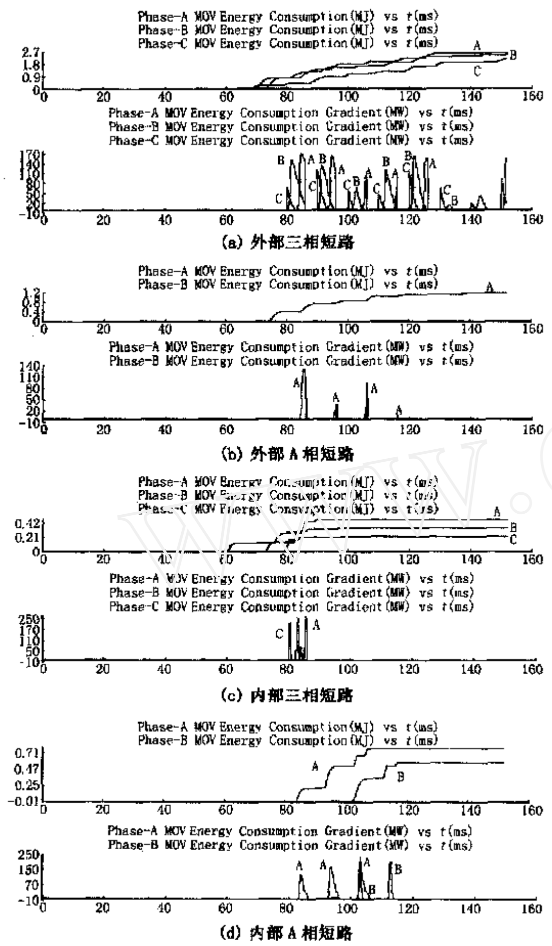


图 7 能耗梯度启动旁路的仿真波形

Fig. 7 Simulation results of energy consumption gradient start bypass

2) 由表 2 可知,当采用能耗梯度启动方式时内部单相短路的能耗水平高于三相短路,这是因为三相短路时的旁路时间早于单相短路,说明三相短路时能耗的增长速度高于单相短路。

3) 与表 1 比较,启动能耗为 0.2 MJ 的内外部故障都旁路的过电压保护方式尽管最大能耗水平很低,但不利于故障切除后系统的暂态稳定控制。因为暂态稳定控制需将 TCSC 调至最大补偿度,这会导致 MOV 的能耗增长,如果启动能耗太低,就容易使旁路误触发,这样就无法发挥 TCSC 的暂态稳定控制作用。为此建议采用外部故障不旁路的过电压保护方式,并以能耗梯度启动旁路。这样既有利于暂态稳定,又可降低对 MOV 容量的要求。

表 2 两种旁路启动方式的能耗水平及旁路时延

Tab. 2 Energy consumption and bypass delay of two bypass start modes

故障类型	能耗启动 (定值:3MJ)		能耗梯度启动 (定值:200MW)	
	最大能耗值/ MJ	旁路时间 / ms	最大能耗值/ MJ	旁路时间 / ms
内部单相	3.031	129	0.777	107.1
内部三相	3.2	102	0.476	89.65
外部单相	1.2	不旁路	1.2	不旁路
外部三相	2.7	不旁路	2.7	不旁路

5 结论

1) 本文首先分析了 TCSC 过电压保护方式与暂态稳定的关系:外部故障不旁路的保护方式对 MOV 的能耗要求较高,其能耗水平与系统的补偿水平、MOV 保护水平、旁路生效时延以及故障切除后的系统摇摆过程有关。

2) 针对过电压保护和系统暂态稳定间的互相矛盾,提出过电压保护控制系统,主要包括过电压保护控制回路、暂态稳定控制回路、容抗限制回路等。

3) 研究了保护性旁路的启动方式。建议采用外部故障不旁路的过电压保护方式,并以能耗梯度启动旁路。这样既有利于暂态稳定,又可降低对 MOV 容量的要求。

收稿日期: 2003-12-19; **修回日期**: 2004-01-27

作者简介:

冯 宇(1978 -),男,博士研究生,从事 FACTS 技术、系统建模与仿真方面的研究;E-mail: fengyu19780119 @163.com

陈士军(1973 -),男,硕士研究生,主要研究方向为电网调度自动化;

陈 奎(1973 -),男,博士研究生,讲师,研究方向为配电系统及其自动化、FACTS 技术。

Research on over-voltage protection mode of TCSC

FENG Yu[1], CHEN Shi-jun[2], CHEN Kui[1], TANG Yi[1]

(下转第 37 页 continued on page 37)

方向元件原理比较简单,方向判别不受故障类型、过渡电阻、负荷电流、系统振荡等因素的影响,无电压死区,能够克服传统方向元件存在的缺陷,在方向性保护中有着良好的应用前景。

参考文献:

[1] 张志竟,黄玉铮(ZHANG Zhi-jing, HUANG Yu-zheng). 电力系统继电保护原理与运行(The Theory and Operation of Power System Protective Relaying) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),1995.

[2] 葛耀中(GE Yao-zhong). 新型继电保护与故障测距原理与技术(New Types of Protective Relaying and Fault Location with Their Theory and Techniques) [M]. 西安:西安交通大学出版社(Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press),1996.

[3] 高厚磊,文锋,王广延,等(GAO Hou-lei, WEN Feng, WANG Guang-yan, et al). 两种多相补偿阻抗继电器动作性能的数字分析(Computer-aided Analysis for Performance of Two Types Distance Relays with Multi-phase Compensation) [J]. 继电器(Relay),1995,23(3):3-9.

[4] 刘万顺(LIU Wan-shun). 电力系统故障分析(Power System Fault Analysis) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),1998.

收稿日期: 2003-12-19; 修回日期: 2004-03-12

作者简介:

高 峰(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为继电保护; E-mail: d1983gf@mail.sdu.edu.cn

高厚磊(1963-),男,教授,博导,主要从事电力系统继电保护、GPS技术在电力系统的应用以及电网实时动态行为监测等方面的研究工作;

魏 然(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为电网实时动态行为监测。

Analysis of the directional relay performance based on the positive-sequence fault components

GAO Feng, GAO Hou-lei, WEI Ran

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The positive-sequence fault components based directional relay is a new type of unit for recognizing fault direction. To understand the relay's performance comprehensively, this paper carries on the simulation calculation and analysis under the conditions of different fault types accompanied with power oscillation and incomplete phase operation on a 500 kV transmission line model. The simulation results show that this new directional relay can adapt to all transmission line fault types. Moreover, its behavior is not affected by load current, and it has no voltage dead zone and owns a high sensitivity.

Key words: directional relay; positive-sequence component; fault component; simulation calculation

(上接第32页 continued from page 32)

(1. College of Information and Electricity, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;
2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The research on over-voltage protection of TCSC is mostly about how to protect TCSC and MOV under fault condition as well as how to reduce the energy consumption level. Consequently, the protection can both meet the requirement of economy and benefit the transient stability of system. Based on the relationship between protection mode and the transient stability, this paper proposes the control strategy of over-voltage protection, and studies the start mode of protective bypass. The simulation result is testified by ANENR software in this paper.

Key words: over-voltage protection; energy consumption; start mode; ARENE simulation