

并联电抗器在超(特)高压 电网中应用及发展

张 丽,徐玉琴

(华北电力大学 电气工程学院,河北 保定 071003)

摘要:研究了超(特)高压输电线路在长线电容效应、不对称接地和突然甩负荷等各种工况下工频过电压的产生,提出了采用并联电抗器进行无功补偿限制工频电压升高的措施。分析了并联电抗器在超(特)高压输电线路单端供电与双端电源供电情况下抑制过电压的作用。分析比较了裂心式、磁饱和式及变压器式 3 种超(特)高压可控并联电抗器的基本工作原理、主要功能和特性,指出裂心式可控电抗器具有非线性伏安特性,兼具大幅度限制操作过电压功能;磁饱和式电抗器的伏安特性与普通电抗器相近,结构简单、控制方便,具有优良的技术经济综合指标;变压器式可控电抗器与磁饱和式可控电抗器相比,谐波电流更小、响应速度更快、功率损耗更小。同时指出了特高压并联电抗器与超高压并联电抗器相比的特殊性。

关键词: 并联电抗器; 超(特)高压; 过电压

中图分类号: TM 472

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0075-04

0 引言

我国电力系统正在向大容量、远距离、超(特)高压的方向发展。为适应快速增长的经济建设,我国西北已建成国内第 1 条 750 kV 电压等级输电线路。1 000 kV 交流输电线路已开展了相关的试验研究,武汉高压研究所于 1986 年建成 200 m 的 1 000 kV 试验线段,研制了特高压试验变压器。超(特)高压输电系统,由于其电压等级提高,可传输更大的容量,更远的距离^[1-2]。但是,线路的电容效应限制了传输

容量,降低了系统静态和动态稳定性,增加了工频过电压幅值,所以超(特)高压输电线路往往装设高压电抗器解决无功平衡和过电压问题^[3]。

常规并联电抗器可在特高压线路投运初期使用。但是,电网中潮流和负荷变化很大,常规并联电抗器不能满足连续、快速控制。若电网缺少快速控制手段,会使电网输电可控性差,常造成大量的电能损耗,或被迫降低输送能力,因此改善技术经济的长远要求则需要可靠的可控电抗器^[4-6]。这里分析了并联电抗器在超(特)高压电网中抑制过电压的作用。论述了 3 种超(特)高压可控并联电抗器的基本原理和主要工作特性,并分析比较了 3 种可控并联电抗

收稿日期:2006-04-24;修回日期:2006-10-11

Application of Simulink in circuit analysis

WANG Qun^{1,2}, GENG Yun-ling³

(1. Department of Electrical and Electronic Information, Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, Changsha 410124, China; 2. Continuing Education College, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. Mechatronics and Automation School, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Features and applications of Simulink Toolboxes in Matlab are introduced, and its blocksets relating to circuit analysis and calculation are explained, such as Simulink, SimPowerSystems and Extra Simulink. With DC steady-state circuits, transient state circuit and sinusoidal steady-state circuit in the circuit curriculum as examples, the way to apply Simulink to circuit modeling and further analysis and calculation is investigated, including the current of DC resistance circuit, the voltage, current and independent source power of DC resistance circuit containing VCCS (Voltage Controlled Current Source), the inductance current and voltage source current of first-order inductance circuit, and the branch current, capacitance voltage and source complex power of sinusoidal steady-state circuit. Some techniques are given. Simulation results are accordant with those of theoretic analysis, which provides a reference for developing computer-aided analysis in circuit curriculum.

Key words: circuit analysis; simulation; power system blocksets; model

器的主要功能和特性。同时,指出了特高压并联电抗器与超高压并联电抗器相比的特殊性。

1 并联电抗器抑制过电压的作用

超(特)高压、长距离输电线路,一般需要考虑线路的分布参数特性。输电线路长线方程如下^[5]:

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} \gamma l + I_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma l \quad (1)$$

$$I_1 = I_2 \operatorname{ch} \gamma l + (U_2 / Z_c) \operatorname{sh} \gamma l \quad (2)$$

式中 U_1, I_1, U_2, I_2 为输电线路首、末端的电压、电流矢量; $Z_c = \sqrt{(R + j\omega L) / (G + j\omega C)}$ 为线路的波阻抗; $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$ 为输电线路的传输常数; l 为线路长度; L, C, R, G 分别为单位长度线路的电感、电容、电阻、对地漏电导。

在单端电源空载长线路电容效应下,可得沿线电压表达式:

$$U_x = \frac{\operatorname{ch} \gamma x}{\operatorname{ch} \gamma l + (Z_s / Z_c) \operatorname{sh} \gamma l} E = k E \quad (3)$$

式中 x 为线路上任一点距线路末端的距离; k 为电压升高系数,对于超(特)高压线路, k 一般大于1,并在线路末端电压达到最大值。

双端电源供电情况下的沿线电压表达式为

$$U_x = U_1 \frac{\operatorname{sh} \gamma x}{\operatorname{sh} \gamma l} + U_2 \frac{\operatorname{sh} \gamma (l - x)}{\operatorname{sh} \gamma l} \quad (4)$$

分析计算可知,双端电源供电的空载长线中点电压最高^[7]。在一般线路长度情况下,双端电源供电的空载线路沿线电压升高并不严重,而单端电源供电时的电压升高却不能忽视。并联电抗器可将单端电源供电时的线路末端电压限制在允许范围内。

单端电源供电的空载长线上发生不对称接地故障时,短路电流的互感效应将使得健全相的相电压更加升高。

$$U = K^{(n)} K_p E \quad (5)$$

式中 U, E 分别为故障后健全相的相电压和故障前正常运行时的相电势; $K^{(n)}$ 为不对称故障引起的电压升高系数; K_p 为电容效应引起的工频电压升高系数。

当线路重负荷运行时,因某种原因(如发生短路)断路器跳闸甩负荷,由于线路上输送着相当大的有功及无功功率,因此甩负荷前电源电势必高于母线电压。根据磁链不变原理,甩负荷后电源暂态电势维持原值,由于空载线路的电容效应,使线路工频过电压升高更为严重。

并联电抗器用于补偿超高压线路的容性充电功率,有利于限制系统中工频电压的升高和操作过电压,降低超高压系统的绝缘水平;可以改善沿线电压分布,增加系统的稳定性和送电能力;并且改善轻负荷线路中的无功潮流,有利于降低有功损耗,防止电压升高,便于系统并网;有利于消除由于同步电机带空载长线出现的自励磁效应;加速潜供电流的熄灭,便于装设单相快速重合闸。

2 超(特)高压可控并联电抗器

超(特)高压输电线路在传输小功率时,并联电

抗器可起到限制工频过电压的作用,但当传输功率接近或大于自然功率时,并联电抗器就成为多余的装置,它不仅使线路电压过分降低,且其无功电流会在电网中造成附加的有功损耗,降低了全网的经济效益。因此,如果并联电抗器能做到容量可调且能快速反应,则更为理想。可控并联电抗器能随线路传输功率的变化而自动平滑地调节自身的容量,且能降低线路操作过电压水平,提高了电网的运行效益。

2.1 超(特)高压可控并联电抗器的类型及原理

对于铁芯式电抗器电感 L 为

$$L = \mu N A / \delta \quad (6)$$

式中 μ 为铁磁材料的导磁率; N 为电抗器绕组的匝数; A 为铁芯截面积; δ 为磁路的气隙长度。

由式(6)可知,可控电抗器可分为4种方案:调节电抗器抽头、直流助磁调磁率、调节电抗器气隙、超导式可控电抗器。其中,采用调节电抗器抽头方案成本很低、调节方便,但电感量无法连续调节;而采用直流助磁式方案(包括变压器式可控电抗器、磁饱和式可控电抗器、直流助磁式可控饱和型电抗器、多并联支路的可控电抗器及裂心式可控电抗器等)通过调节直流激磁电流的大小改变交流等值磁导从而实现电感连续可调,其响应速度快,但长期正常运行时,铁芯处于磁饱和状态,损耗大、噪声大、谐波较大;调节电抗器气隙方案电感量可以连续调节,结构也简单,但是需要较为精密的机械传动装置,响应慢、噪声也很大;超导式可控电抗器是利用超导体的超导态及正常态的转变特性,线路正常时,超导体处于超导态,具有零电阻和完全排磁通效应(迈斯纳效应),装置阻抗很低,在发生短路故障时,它转为正常态,具有一定的电阻^[8-11]。

在超(特)高压电网中常规并联电抗器具有响应速度慢、连续可控性差的缺点,不能很好地满足动态无功补偿的需要。传统的晶闸管控制电抗器较好地解决了上述问题,但其工作过程中将产生大量的谐波电流注入系统,为消除这些谐波需增加大量的滤波器,从而增加了装置的占地面积和造价。针对上述缺点,裂心式可控电抗器、磁饱和式可控电抗器及变压器式可控电抗器则具有谐波电流较小、功率损耗较低等优点。

2.1.1 裂心式可控电抗器

三相超(特)高压裂心式可控电抗器主绕组的结构布置如图1所示(分裂铁芯及助磁绕组未画出)。电抗器的工作铁芯分裂为两半,匝数各为 N_y 的2个直流控制绕组分别套在半铁芯柱上所产生的直流磁通在两上半铁芯自成回路,交流工作绕组 N 绕在整体的2个铁芯柱上。所产生的交流磁通通过2个并联半铁芯和旁轭闭合。控制绕组由电压为 U_y 的直流电源提供。调节 U_y 的大小以改变铁芯的磁饱和度和,可以平滑地改变电抗器的容量。

2.1.2 磁饱和式可控电抗器

磁饱和式可控电抗器(MCSR)基于磁放大器原理工作,图2为工作原理图。由图可见,2个晶闸管不导通时,可控电抗器工作于空载状态。2个晶闸管

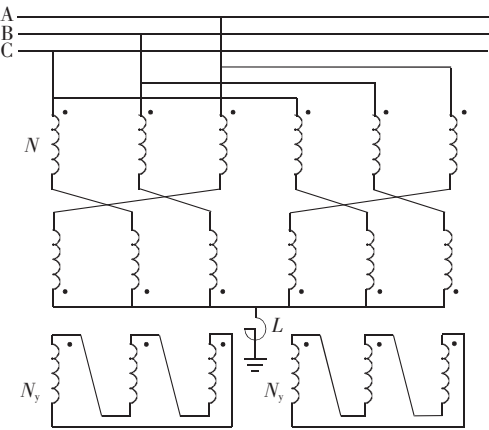


图 1 裂心式可控电抗器原理图

Fig.1 Principle of the split core controlled reactor

在电源正、负半周里依次导通和关断时,在绕组回路中产生相应的直流环流(其大小由晶闸管导通角决定)。该环流产生的直流磁通改变了 2 个铁芯的饱和程度,控制晶闸管的导通角即可调节电抗器功率。显然,磁饱和现象会在绕组中产生相应的谐波电流,适当的参数设计可将其抑制到较低的水平。多年前,俄罗斯已试制成这种类型的可控电抗器,接在 500 kV 变电所的母线上。

2.1.3 变压器式可控电抗器

20 世纪末提出的变压器式可控电抗器(TCSR),其工作原理见图 3,可见它实为一高短路阻抗的多绕组变压器。图中,HVW 为高压工作绕组;CW₁、CW₂、…、CW_n 为低压控制绕组,各个 CW 中串接反并联晶闸管,每个 CW 的额定功率是电抗器总额定功率的一部分,主要根据电网谐波要求而定。当第 i 个 CW_i 投入工作时,第 1、2、…、i-1 个 CW 绕组均工作于短路状态,可认为其中无谐波电流存在。这样,HVW 中工作绕组的电流谐波只由 CW_i 的晶闸管导通程度决定,因此,当依次把 CW 投入工作并正确控制晶闸管的导通和关断时,其功率从空载到额定连续自动变化,满足谐波电流的要求。

2.2 特性分析

a. 裂心式可控电抗器采用外加直流励磁系统,具有非线性伏安特性。为使裂心式可控电抗器获得强补功能,大幅度限制线路操作过电压,其额定磁饱和度较低。低额定磁饱和度的可控电抗器会产生高

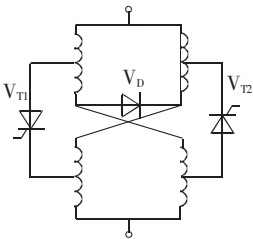


图 2 磁饱和式可控电抗器原理图

Fig.2 Principle of magnetic valve controlled reactor

水平的谐波,所以采用分裂技术,消除 3、5、7 的倍数次谐波,减少谐波含有率。同时,兼具大幅度限制操作过电压的功能,适用于操作过电压水平较高的超(特)高压线路。

b. 磁饱和式可控电抗器具有良好的线性伏安特性,在一定触发延迟角下与普通的线性电抗器一样具有恒定的电抗值。其晶闸管两端只施加低电压,通过的只是不大的直流电流而非电抗器主电流,故其耐压和容量要求很低,控制和维护相对方便。其额定磁饱和度已达极限值,可大幅减少所产生的谐波,但同时也需要采用合闸电阻和氧化锌避雷器限制操作过电压。磁饱和现象和相应的漏磁会增大边缘心柱和磁轭的涡流损耗,故抑制温升和振动亦为棘手问题。

c. 变压器式可控电抗器实为一高短路阻抗的多绕组变压器,本质上与普通变压器很类似,可借用普通变压器的制造技术,工作条件和运行维护无特殊要求。通常,输出电流的谐波含量和处于全导通状态的控制绕组的个数及容量、处于调节状态绕组容量占电抗器总容量的比例、处于调节状态绕组的晶闸管触发角等因素有关。除有磁饱和式可控电抗器的优点外,变压器式可控电抗器的谐波电流更小、响应速度更快、功率损耗更小。

2.3 特高压可控并联电抗器的特殊性

我国即将兴建特高压线路,由此形成完整的超(特)高压系列设备。全套高质量的特高压设备乃是建立特高压系统的必要前提,特高压并联电抗器则是其重要组成部分之一,其容量比超高压大得多^[12]。

令 U_N 为额定线电压, ω 为角频率, l_b 为被补偿线段长度, B 为补偿度, Z 为导线正序波阻抗, v_c 为光速,则电抗器的容量应为

$$Q=U_N^2\omega l_b B/v_c Z \tag{7}$$

以 500 kV 超高压电网为例,1 000 kV 特高压电网是 500 kV 超高压电网电压的 2 倍,相应的波阻抗与后者之比小于 0.7,故同样长度线段和同补偿度时前者补偿容量与后者之比大于 $2^2/0.7=5.7$ 。当前 500 kV 电抗器三相容量为 90~180 MV·A,则特高压电抗器为 500~1 000 MV·A 的庞然大物。沿用超高压并联电抗器已有的制作经验,非可控特高压电抗器可望在不长的时期内制成,并提供特高压线路投运初期使用,而改善技术经济的长远要求则必须尽快研制可靠的超高压可控电抗器。

3 结论

a. 并联电抗器是超(特)高压电网中必不可少的无功补偿设备,能够抑制工频、操作过电压。常规并联电抗器具有响应速度慢、连续可控性差的缺点,故不能很好地满足动态无功补偿的需要。

b. 超(特)高压可控并联电抗器能随线路传输功率的变化而自动平滑地调节自身的容量,提高了电网的运行效益。

c. 裂心式可控电抗器具有非线性伏安特性,兼具大幅度限制操作过电压功能;磁饱和式电抗器的伏安特性与普通电抗器相近,结构简单、控制方便,具有优良的技术经济综合指标;变压器式可控电抗器与磁饱和式可控电抗器相比,谐波电流更小、响应速度更快、功率损耗更小。

d. 特高压电抗器与超高压电抗器相比容量庞大,改善技术经济的长远要求必须尽快研制可靠的超高压可控电抗器。可控电抗器在超(特)高压电网中具有很大的应用潜力。

参考文献:

- [1] 陈水明,许伟,何金良. 1 000 kV 交流输电线路的工频暂态过电压研究[J]. 电网技术,2005,29(19):1-5.
CHEN Shui-ming,XU Wei,HE Jin-liang. Research on power frequency transient overvoltage in 1000 kV UHV AC transmission line[J]. Power System Technology,2005,29(19):1-5.
- [2] 舒印彪. 1 000 kV 交流特高压输电技术的研究与应用[J]. 电网技术,2005,29(19):T1-T6.
SHU Yin-biao. Research and application of 1000 kV AC transmission technology[J]. Power System Technology,2005,29(19):T1-T6.
- [3] 李斌,李永丽,贺家李. 750 kV 线路保护与并联电抗器动作的研究[J]. 电力系统自动化,2005,29(11):40-44.
LI Bin,LI Yong-li,HE Jia-li. Research of 750 kV line protection and shunt reactors operation[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(11):40-44.
- [4] 黄艳燕. 750 kV 交流输电系统工频过电压与操作过电压的研究[D]. 西安:西安交通大学,2004.
HUANG Yan-yan. Research on power frequency transient overvoltage and transient overvoltage in 750 kV AC transmission system[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2004.
- [5] 盛鹏. 750 kV 输电线保护及重合闸动作与过电压的抑制[D]. 天津:天津大学,2004.
SHENG Kun. 750 kV transmission line protect & autorecloser

- operation for limiting over-voltage[D]. Tianjin:Tianjin University, 2004.
- [6] 徐基泰. 40 年来电抗器的发展[J]. 变压器,2004,41(3):45-50.
XU Ji-tai. The development of the reactors for 40 years[J]. Transformer,2004,41(3):45-50.
 - [7] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
 - [8] 盛鹏,李永丽,李斌,等. 特高压输电线路过电压的研究和仿真[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(6):13-18.
SHENG Kun,LI Yong-li,LI Bin,et al. Research and simulation of over-voltage in UHV transmission lines[J]. Proceedings of the EPSA,2003,15(6):13-18.
 - [9] 周腊吾,徐勇,朱青,等. 新型可控电抗器的工作原理与选型分析[J]. 变压器,2003,40(8):1-5.
ZHOU La-wu,XU Yong,ZHU Qing,et al. Principle and type selection analysis of new type controlled reactor[J]. Transformer,2003,40(8):1-5.
 - [10] 刘涤尘,陈柏超,田翠华,等. 新型可控电抗器在电网中的应用与选型分析[J]. 电网技术,1999,23(2):52-54.
LIU Di-chen,CHEN Bo-chao,TIAN Cui-hua,et al. Application and type selection analysis of new type controlled reactor in power system[J]. Power System Technology,1999,23(2):52-54.
 - [11] 田铭兴,励庆孚. 磁饱和式和变压器式可控并联电抗器[J]. 高电压技术,2003,29(7):26-27.
TIAN Ming-xing,LI Qing-fu. Magnetic valve type controlled reactor and transformer type controlled reactor[J]. High Voltage Engineering,2003,29(7):26-27.
 - [12] 陈维贤,陈禾,鲁铁成,等. 关于特高压可控并联电抗器[J]. 高电压技术,2005,31(11):26-27.
CHEN Wei-xian,CHEN He,LU Tie-cheng,et al. Ultra-high voltage controllable shunt reactor[J]. High Voltage Engineering,2005,31(11):26-27.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

张丽(1983-),女,河北保定人,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护(E-mail:janezl_612@126.com);
徐玉琴(1964-),女,河南开封人,教授,从事电力系统分析与控制、电力系统继电保护等方面的教学与研究工作。

Application and development of shunt reactors in EHV & UHV transmission lines

ZHANG Li,XU Yu-qin

(North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: The power frequency over-voltage of EHV(Extra High Voltage) & UHV(Ultra High Voltage) power transmission lines in three operating conditions,i.e. capacity effect of unloaded line, unsymmetrical faults and load shedding is analyzed,and measures are put forward to limit the power frequency voltage rising by using the shunt reactor to compensate the reactive power. The function of the shunt reactor to restrain power frequency over-voltage is analyzed theoretically for EHV & UHV transmission lines with single power supply or double power supplies. Basic principles, main functions and characteristics of three high-voltage controllable shunt reactor types are analyzed and compared,i.e. split core type,magnetic valve type and transformer type. The volt-ampere characteristic of the split core type controllable shunt reactor is nonlinear,and the switching over voltage can be restrained greatly. The volt-ampere characteristic of the magnetic valve type controlled shunt reactor is similar to the common reactor,which is simple and convenient for control,with satisfying technology and economy index. Compared with the magnetic valve type controlled shunt reactor,the transformer type controlled shunt reactor is superior in its smaller harmonic current,faster respond speed and less power loss. Based on the comparison of shunt reactor used in EHV network and UHV network,the particularity of UHV shunt reactor is discussed.

Key words: shunt reactor; EHV & UHV; over-voltage