

500 kV 线路串联补偿电容器组的接线方式及保护

祁胜利¹, 赵海纲¹, 钱锋²

(1. 大同超高压供电公司, 山西 大同 037038; 2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘要: 分析了串补平台接线方式、CT 配置对电容器和 MOV 保护的影响, 以及火花间隙保护配置。比较了电容器组 1 个 H 形桥和 2 个 H 形桥接线, 后者较前者可以更快定位故障的电容器; 比较了这两种接线的 CT 配置, 配置有电容器总支路 CT 的接线, 可以更好地实现断路器合闸失灵保护, 在不平衡保护的整定方面应该区别对待; 比较了有分支和无分支 MOV 接线形式及其 CT 配置, 前者较后者更容易检测故障单元, 有分支接线可以更好地实现 MOV 故障保护。火花间隙应该配置自触发、拒触发、延时触发、持续触发保护, 更好实现对一次设备的保护。

关键词: 串联电容补偿; 保护; 二次系统; 设计; 接线

Connection mode and protection of 500 kV transmission line series compensation capacitor bank

QI Sheng-li¹, ZHAO Hai-gang¹, QIAN Feng²

(1. Datong EHV Power Transmission Company, Datong 037038, China;
2. North China Electric Power Research Institute Co. Ltd, Beijing 100045, China)

Abstract: This paper analyzes how do connection of series compensation and the CT configuration affect the capacitors and MOV protection, and the spark gap protection configuration. Comparing the capacitor of 1 H-shaped bridge connection with that of 2, the latter is faster at locating the fault capacitor. As for the two connections, the one equipped with capacitor circuit branch CT can achieve the protection better when circuit breaker fails. So, it should be treated differently while setting the unbalance protection. It compares the branching with non-branchings in the connections of MOV and CT configuration. The former can detect false units easier while the latter can better achieve the protection of MOV fault. Spark gap should be configured with the self triggering, refuse triggering, delay triggering, continuous triggering protection, which is better for realizing primary equipment protection.

Key words: series capacitor compensation; protection; secondary system; design; connection

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)04-0063-05

0 引言

串联电容补偿技术作为提高输变电网稳定极限以及经济性的有效手段之一^[1-6], 从开始应用到今天已在我国电力系统得到了广泛的推广^[7-8]。串联电容补偿装置的一次设备和二次设备集成通常由一个厂家来完成, 在实际应用中由于生产厂家不同, 串联补偿装置平台的一次设备接线形式、CT 配置及各主要设备保护配置也不尽相同。

串联电容补偿装置的一次设备接线形式是综合考虑设备性能、过电压水平等各种因素确定的。串联电容补偿装置的一次设备接线形式一旦确定, 保护控制系统应该与其相适应, 实现对串联补偿装置的一次设备保护的。串联补偿一次设备接线的形式、CT 配置不同就会影响到保护控制系统设计,

即使一次设备接线形式相同, 但是为了对设备更全面的保护, 也应该充分考虑合理的保护配置。

本文结合工程实际主要分析了一次设备接线不同的形式、CT 配置对保护控制系统的影响; 火花间隙保护的配置问题。通过分析研究以找到一种串补站二次系统最优的设计方案。

1 电容器组

1.1 电容器组接线及 CT 配置

串联补偿装置的电容器组是由多个电容器单元通过串、并联方式组合而成, 当电容器单元内熔丝^[9]熔断时就会使其它电容器单元电压不平衡, 进而发展为过电压, 造成电容器贯穿性短路^[10]。由于电容器暂态测量阻抗和稳态测量阻抗有一定差异^[11]等原因, 使得电容器阻抗在线检测有一定难度。通常将

电容器分为 4 个桥臂接成 H 形，在其中加上不平衡 CT，来检测电容器单元是否有熔丝熔断。对于 H 形接线形式的电容器在设计和选择上要尽可能地使各个桥臂上的电容参数一致，以降低不平衡电流。

串补电容器在实际工程中有如图 1 所示两种接线形式。

电容器两种接线方式各有优缺点，表 1 是两种接线的比较。

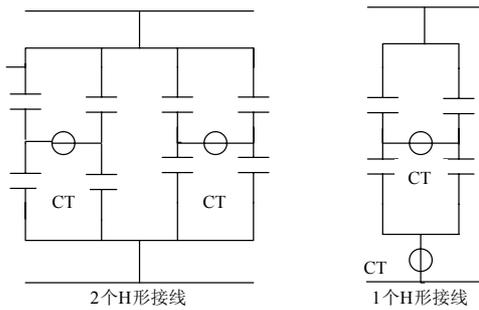


图 1 电容器接线

Fig.1 Capacitor line connection

表 1 电容器接线比较

Tab.1 Comparison of capacitor line connection

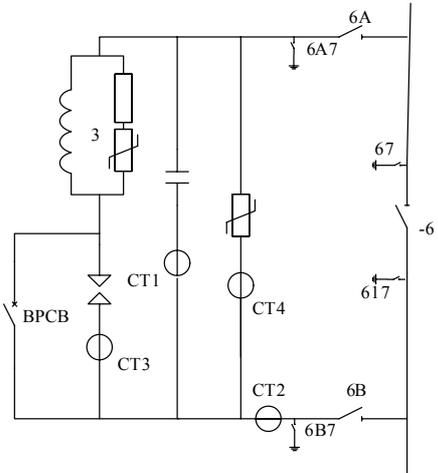
接线形式	优点	缺点
2 个 H 形接线	当电容器组发生故障后容易查找故障电容器单元，由于实际用的电容器单元数量很大，可以缩短查找故障电容器单元的时间	对电容器的配平要求较高 ^[11]
1 个 H 形接线	电容器的配平工作量减少	当电容器组有故障时检测故障电容器单元比 2 个桥接线麻烦

1.2 电容器接线对合闸失灵保护的影响

旁路断路器合闸失灵保护：串补所在线路或串补装置发生故障，其相应保护动作，发出合旁路断路器命令，恰好旁路断路器发生合闸故障，无法合上，设定延时到后，旁路断路器仍未合上，合闸失灵保护动作将串补所在线路两侧断路器跳开，切除故障。

在实际工程中，由于电容器接线不同，旁路断路器合闸失灵保护的逻辑判据条件也不同。对于 1 个 H 形接线，由于配置了电容器电流互感器 CT1（如图 2 所示），通过电容器 CT1 就可以反映电容器组上的电流。旁路断路器的分合闸位置对电容器上的电流是有影响的。如果旁路断路器处于合闸位置时（电容器组的放电电压衰减至 10% 以下的时间小于 5 ms^[12]，所以不考虑放电电流的影响），电容器上

的电流就为零。所以可以将电容器上的电流作为判断旁路断路器合闸失灵的条件之一，逻辑如图 3 所示。



CT1 为电容器电流互感器；CT2 为线路电流互感器；CT3 为火花间隙电流互感器；CT4 为 MOV 电流互感器

图 2 固定串补接线

Fig.2 Line connection of FSC

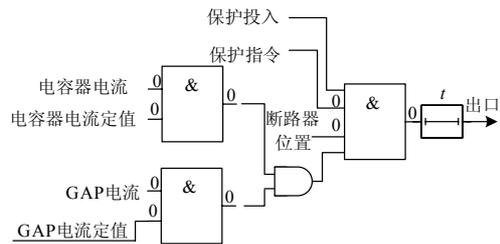


图 3 断路器合闸失灵保护逻辑

Fig.3 Logic of bypass circuit breaker fail to close

对于 2 个 H 形接线，没有配置电容器电流互感器，电容器上的电流依赖于装在串补装置上的线路电流互感器 CT2（如图 2 所示）反映。旁路断路器处于分闸和合闸位置时，线路电流是相同的（不考虑串补投退，引起线路负荷电流变化的影响）。线路电流不能作为旁路断路器合闸失灵的逻辑判据条件。

旁路断路器合闸失灵保护动作后，要切除串补装置所在线路两侧的断路器，其动作行为较为严重，因此对于断路器合闸失灵保护在逻辑判断上应该更为严格，所以在动作逻辑中加入电流判据是合理的。对于 2 个 H 形接线，增加总电容器电流互感器是最优化的设计方案。

1.3 电容器不平衡保护的整定

电容器不平衡保护的整定除了考虑电容器熔丝特性的影响外，还应该考虑电容器过电压、最小起

动电流、电容器放电暂态过程的影响。

1) 过电压

电容器不平衡保护定值的整定基本原则是防止由于电容器单元损坏或电容器单元内部熔丝熔断使其余电容器承受的过电压超过范围而导致电容器组损坏。以 500 kV 神-保串补工程为例, 单相电容单元 336 个, 其中电容器单元以 28 并 12 串, 单元容量 51.9 μF, 计算结果见表 2。

表 2 电容器过电压定值计算结果

Tab.2 Results of capacitor overvoltage setting

熔丝熔断元件数	故障单元过压因数	故障元件组压因数	不平衡电流/A	单元电容/μF	电容器组电压/V	保护定值/A
0						
1	1.001	1.040	0.15	50.98	70 863	
2	1.004	1.084	0.32	49.90	70 871	
3	1.007	1.133	0.51	48.74	70 881	
4	1.010	1.186	0.71	47.46	70 891	告警 0.8
5	1.014	1.244	0.93	46.08	70 903	
6	1.018	1.308	1.17	44.56	70 916	
7	1.022	1.380	1.44	42.89	70 930	
8	1.027	1.459	1.74	41.04	70 946	跳闸 1.8
9	1.032	1.549	2.08	38.99	70 964	
10	1.039	1.649	2.46	36.69	70 984	
11	1.046	1.765	2.89	34.11	71 007	
12	1.054	1.897	3.39	31.19	71 033	

2) 最小起动电流

电容器 H 形桥不平衡电流的大小与流过电容器组总的电流成一定比例。由于电容器参数不一致等因素的影响, 在运行中会产生不平衡电流, 为了消除这些因素引起的不平衡电流的影响, 设定最小起动电流。在运行中, 电容器电流或线路电流小于最小起动电流时, 如果检测到的不平衡电流很大, 也不会引起电容器组的损坏, 所以保护不会动作; 反之, 当电容器电流或线路电流大于最小起动电流时, 即使有小的不平衡电流, 保护也有可能动作。一般最小起动电流设定为额定电流的 10%, 图 4 为不平衡保护动作曲线。对于 2 个 H 形桥支路的接线形式, 最小起动电流为: $1/2I_{LC} \times 10\%$, 其中 I_{LC} 为线路电流。

对于 1 个 H 形桥支路的接线形式, 最小起动电流为: $I_C \times 10\%$, 其中 I_C 为电容器组总电流。

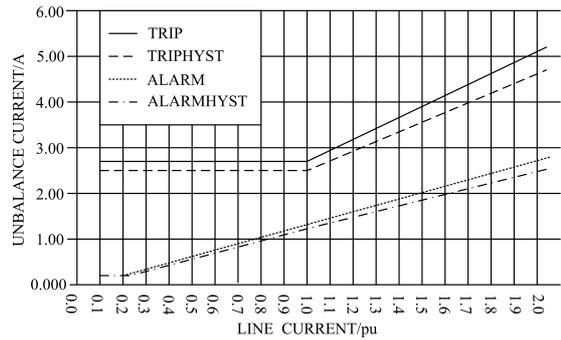


图 4 不平衡保护动作曲线

Fig.4 Curve of unbalance protection

3) 电容器放电暂态过程影响

在电容器组退出运行时, 电容器组会通过阻尼回路、旁路断路器形成放电回路, 产生高频的放电涌流^[13]。由于电容器参数的杂散性, 在高频的放电涌流作用下会产生不平衡电流, 不平衡保护应该躲过电容器放电的暂态过程, 因此不平衡保护应该考虑动作延时, 以增加不平衡保护的可靠性。

2 MOV 装置

2.1 MOV 装置接线及 CT 配置

金属氧化物限压器 (MOV) 是串联补偿装置中电容器组的基本过电压设备。MOV 具有良好的非线性伏安特性^[14], 可以限制输电线路故障条件下在串补装置的电容器组上产生的工频过电压, 这个电压将低于电容器组的绝缘水平^[15]。MOV 是由金属氧化物阀片组成的, 且 MOV 采用多单元并联及多柱结构^[16-17]。在输电线路故障时, MOV 将通过故障电流, 如何使各单元以致各柱阀片电流分配均匀是此 MOV 研究的最重要的关键问题^[18]。

串补 MOV 装置在实际工程中有图 5 所示两种接线方式。

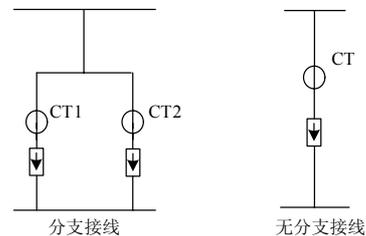


图 5 MOV 接线

Fig.5 MOV line connection

MOV 装置两种接线方式各有优缺点, 表 3 是两种接线的比较。

表 3 MOV 接线比较
Tab.3 Comparison of MOV line connection

接线形式	优点	缺点
有分支接线	1. 运行时 MOV 仅流过极小的泄露电流, 检查该电流不易发现 MOV 阀片的特性变化或损坏, 将 MOV 分为两个并联支路, 通过比较两个支路的电流, 可以有效解决这个问题; 2. MOV 故障后容易查找故障的 MOV。	1.对 MOV 阀片配平要求比较高; 2.要求两组电流互感器的特性匹配。
无支形接线	1. 接线简单; 2. MOV 阀片配平相对简单。	在保护中无法实现不平衡保护

2.2 MOV 故障保护

如图 5, 分支接线形式由两个并联支路组成, 可以很容易实现不平衡保护, 来检测 MOV 的故障。不平衡保护动作逻辑见图 6。当 MOV 的不平衡电流瞬时值大于设定值时, 判断 MOV 发生故障, MOV 不平衡保护动作触发间隙, 同时闭合串联补偿装置旁路断路器, 永久闭锁, 以保护 MOV 和电容器。

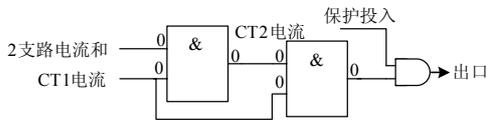


图 6 MOV 保护动作逻辑

Fig.6 Logic of MOV protection

在图 5 中, 无分支接线的形式, 为了方便检测 MOV 的故障, MOV 故障保护需要通过比较流过 MOV 设备的电流(I_{mov})和线路电流(I_{lc})来确定 MOV 故障, 即比较 I_{mov} / I_{lc} 值来确定。在 500 kV 神-保串补工程中, 当 $I_{mov} / I_{lc} > 0.85$, 并且故障持续 10 ms, 保护发出永久旁路、永久闭锁命令, 将旁路断路器三相旁路。

2.3 MOV 的电流互感器

对于采用分支接线形式, 两个支路中 CT 特性是否匹配对不平衡保护的影响很大, 其中测量到的不平衡是两个 CT 的测量之差, 例如电流互感器的测量误差为 $\pm 5\%$, 则两个电流互感器的测量最大误差有可能达到 $\pm 10\%$, 因此对于这种接线形式必须做好 CT 的特性匹配工作, 减少对不平衡保护的影响。

3 火花间隙

火花间隙由于运行环境影响或设备自身原因在

运行过程中有可能会自触发^[19]、拒触发、延时触发、持续触发等非正常触发故障。

自触发: 在串补保护没有发出触发命令时, 电流流过间隙, 即发生了自触发。当保护检测到间隙自触发后, 将旁路断路器三相暂时旁路, 经过一定时间的延时, 重投串补装置。假若自触发重复次数超过设定值, 则永久闭锁。

拒触发: 火花间隙在接收到 MOV 保护单元发出的触发信号后, 由于某种原因不能触发, 保护将旁路断路器闭合, 并将其永久闭锁。

延时触发: 当检测到电流通过火花间隙比发出触发信号时间晚许多, 则判断为延时触发, 保护将旁路断路器闭合并永久闭锁。

持续触发: 由于火花间隙的设计原则仅限于短时通过短路电流, 当保护发出触发命令后, 在一定延时时旁路断路器不能闭合, 就需要将串补电容器切除。

实际工程应用中, 火花间隙保护配置如表 4 所列。在 500 kV 托-源-安(霸)串补工程中, 因为在旁路断路器合闸失灵保护(合闸失灵保护逻辑见图 3)中已有对火花间隙持续触发的监视, 所以在火花间隙的保护配置中没有重复配置。在 500 kV 神-保串补工程中, 火花间隙保护与 500 kV 托-源-安(霸)串补工程比较, 增加了持续触发保护, 但是没有配置延时触发保护。

表 4 火花间隙保护配置比较

Tab.4 Comparison of the disposition of spark protection

工程应用	火花间隙保护配置
托-源-安(霸)串补 (厂家: 中国电科院)	自触发保护
	拒触发保护
	延时触发保护
神-保串补 (厂家: NOKIAN)	触发监视保护(自触发保护)
	持续触发保护
	拒触发保护

火花间隙在运行中有可能出现非正常的触发故障^[19]。对于微机保护装置实现一个保护功能仅是增加一个程序, 不会增加设备投资, 也不会使二次回路复杂化。在串补工程的设计中, 为了在火花间隙出现故障后能够快速地切除, 火花间隙应该配置全面的保护, 以实现对其更好的保护。

4 结论

本文通过分析得到如下结论:

(1) 串联补偿的电容器组通过 H 形桥接线形式解决了电容器在线检测的困难, 并且通过增加 H 形桥方便故障电容器单元的查找。两种电容器接线形

式对于电容器不平衡保护的整定是有影响的,在保护整定时要给予关注。考虑到断路器合闸失灵保护后果的严重性,为了增加断路器合闸失灵保护动作的可靠性,增加电容器 CT 是必要的。

(2) 通过分析 MOV 接线及 CT 配置,我们可以看到:在 MOV 装置的接线中通过增加 MOV 支路方便了在运行状态时检测性能变坏或故障的单元,并且很容易实现 MOV 故障保护,所以是一种较为理想的接线形式。

(3) 火花间隙作为串补重要的设备,应该进行全面的保护配置,以适应串补一次设备保护的要求。

参考文献

- [1] 赵玉柱,朱伟江,马骁. 串联电容补偿在电力系统中的应用[A]. 第二十七届中国电网调度运行会议[C]. 2001. 21-28.
ZHAO Yu-zhu, ZHU Wei-jiang, MA Xiao. The Application of Series Capacitance in the Electric Power System[A]. in: The 27th Conference of China Electric Power Control and Operation[C]. 2001. 21-28.
- [2] 陈葛松,林集明,等. 500 kV 串补站过电压保护研究[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 21-24.
CHEN Ge-song, LIN Ji-ming, et al. Overvoltage Protection for 500 kV Series Compensation Station[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 21-24.
- [3] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. 311-312.
- [4] 朱宏杰,朱任翔,陈雷. 第 1 套国产化串联电容器补偿装置的工程化应用[J]. 电力建设, 2006, 27(12): 12-13.
ZHU Hong-jie, ZHU Ren-xiang, CHEN Lei. Engineering Application of the First Domestic Series Capacitor Compensator[J]. Electric Power Construction, 2006, 27(12): 12-13.
- [5] 翟耀希,陈亚伦. 伊敏-大庆 500 kV 系统串联补偿方案研究[J]. 电网技术, 1994, 18(5): 49-53.
ZHAI Yao-xi, CHEN Ya-lun. Study of Series Capacitor Compensation in Yimin-Daqing Transmission Line[J]. Power System Technology, 1994, 18(5): 49-53.
- [6] 吕志瑞,刘军,范迪才. 500 kV 线路加装串联电容补偿装置的施工[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 35-39.
Lü Zhi-ruì, LIU Jun, FAN Di-cai. Construction of Series Capacitor Compensation (SC) for Existing 500 kV Transmission Lines[J]. Electric Power, 2005, 38(10): 35-39.
- [7] 刘晓冬,朱子述,陈陈. 可控串联补偿电容器的过电压保护[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(12): 1476-1481.
LIU Xiao-dong, ZHU Zi-shu, CHEN Chen. Overvoltage Protection of Thyristor Controlled Series Capacitors[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(12): 1476-1481.
- [8] 马乃兵. 500 kV 固定串联补偿装置技术特点分析[J]. 电力电容器, 2001(4): 1-6.
MA Nai-bing. Technical Feature Analysis of 500 kV Fixed Series Capacitive Compensation Installation[J]. Power Capacitors, 2001(4): 1-6.
- [9] 李怀玉,刘万芝. 串联电容器的研究[J]. 电力电容器, 2003(21): 46-48.
LI Huai-yu, LIU Wan-zhi. The research of series capacitor[J]. Power Capacitor, 2003(21): 46-48.
- [10] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 2 版[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
WANG Wei-jian. Principle and Application for Electric Equipment Protection, 2nd ed[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [11] 余江,周红阳,赵曼勇. 高压电容器不平衡保护的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 85-89.
YU Jiang, ZHOU Hong-yang, ZHAO Man-yong. Related Problems of Unbalance Protection for High Voltage Capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 85-89.
- [12] 汤广福,李功新. 先进电力电子技术在超高压输电电网中的应用[J]. 变流技术与电力牵引, 2006(2): 28-34.
TANG Guang-fu, LI Gong-xin. Study on the Application of Advanced Power Electronic Technology in EHV Power System[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2006(2): 28-34.
- [13] 刘平,牛晓民. 万全串补人工接地试验及串补保护误动作分析[J]. 华北电力技术, 2005(8): 1-3.
LIU Ping, NIU Xiao-min. Introduce of Fault Test on SC at Wanquan Substation and Analysis of False Operation of Unbalance Protection[J]. North China Electric Power, 2005(8): 1-3.
- [14] 倪学峰,吴义华,林浩,等. GB/T6115.2-2002、IEC60143-2: 1994 电力系统用串联电容器第二部分: 串联电容器组用保护装置[Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2002.
- [15] 刘之方,李国富,李志强. 串联补偿用金属氧化物限压器[A]. 中国电机工程学会高电压专业委员会[C]. 2004. 916-920.
- [16] 吴养东,胡春梅,等. 金属氧化物限压器(MOV)中某一阀片短路后的故障检测方法[J]. 电网与水力发电进展, 2007(12): 53-55.
WU Yang-dong, HU Chun-mei, et al. Method for Short-circuit Fault Detection in Non-linear Resistor Element of MOV Units[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2007(12): 53-55.
- [17] 刘晓冬,朱子述,陈陈. 500 kV 线路串补电容器上过电压研究[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(12): 142-146.

(下转第 73 页 continued on page 73)

- [7] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002. 581-626.
Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. 581-626.
- [8] Huang S J, Huang C C. Adaptive Approach to Load Shedding Including Pumped-storage Units During Underfrequency Conditions[A]. in: IEE Proceedings-Gener, Transm, and Distrib[C]. 2001. 165-171.
- [9] 曹柱中, 徐薇莉. 自动控制理论与设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003. 75-79.
CAO Zhu-zhong, XU Wei-li. Automatic Control Theory and Design[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003. 75-79.

附录

现定义文中用到的几个参数^[9]。

1) 最低频率

见图 10, 定义最低频率为频率下降所至最低并开始回升点, 即 f_{\min} 。

2) 下降时间

定义下降时间为频率从 50 Hz 降至最低点的时间, 即图中 t_{\min} 。

3) 调整时间

定义调整时间为系统频率值到达稳态值 ($\pm 5\%$) 的最早时间, 即图中 t_{regulate} 。

4) 稳态误差

定义稳态误差为系统频率稳态值 f_{∞} 与额定频率 50 Hz 的差值: $\Delta f = 50 - f_{\infty}$ 。

5) 最大超调量

定义最大超调量为暂态期间输出超出输出稳态的百分数: $\delta = \frac{f(t_p) - f(\infty)}{f(\infty)} \times 100\%$ 。

超调量考察的是切负荷方案与调速器配合的情况。

6) 总切负荷量

总切负荷量指所切负荷的总量, 体现了切负荷整定方案的经济性。所切负荷量越少, 说明损失负荷较少, 方案经济性能越好。这在电力市场下, 是尤为重要的。

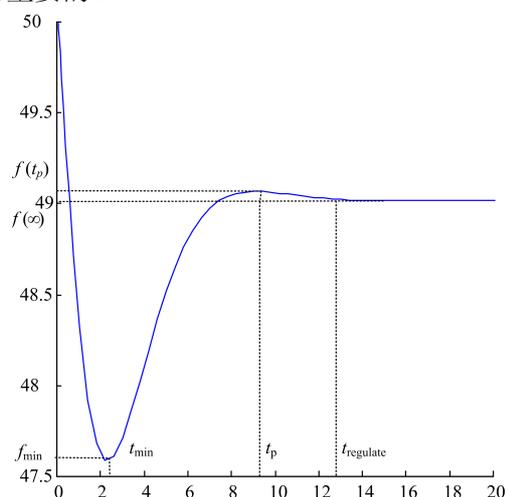


图 10 参数说明图

Fig.10 Characters definition

收稿日期: 2009-02-25; 修回日期: 2009-04-14

作者简介:

常喜强 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与仿真;

何恒靖 (1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统仿真;

解大 (1969-), 男, 副教授, 研究方向为 FACTS、并网型风力发电、电力系统仿真及智能电网。E-mail: xieda@xjtu.edu.cn

(上接第 67 页 continued from page 67)

LIU Xiao-dong, ZHU Zi-shu, CHEN Chen. Study of Overvoltage on Series Capacitor of 500 kV Transmission Lines[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1997, 31 (12): 142-146.

- [18] 王伯成. ± 500 kV 直流工程用 E 型、F 型无间隙金属氧化物避雷器的设计[J]. 电瓷避雷器, 2001(4): 24-28.
WANG Bo-cheng. Design of E and F Types of Gapless MOA for ± 500 kV DC Project[J]. Insulators and Surge Arresters, 2001(4): 24-28.

- [19] 武宇平, 钱锋, 赵淑珍. 丰万顺串补与大房线 500 kV

串补站串补保护触发回路[J]. 华北电力技术, 2004(12): 24-28.

WU Yu-ping, QIAN Feng, ZHAO Shu-zhen. Protective Trigger Circuits of Feng-wan-shun and Datong-Fangshan Line 500 kV Series Compensation Equipment[J]. North China Electric Power, 2004(12): 24-28.

收稿日期: 2009-03-13; 修回日期: 2009-05-05

作者简介:

祁胜利 (1975-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、自动化技术。E-mail: hykb1228@sina.com