

谐波对集合式并联电容器内部故障保护的影响

马亮¹, 钱珞江²

(1. 江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 集合式并联电容器在实际运行中发现其内部故障保护的误动率较普通电容器高, 并且容量越大, 保护误动率越高。根据集合式电容器内部结构特点, 基于内部故障保护动作整定值设置的基本法则, 从高次谐波对内部元件最大允许故障率的影响角度阐明了误动率高的原因; 同时分别针对单星形、双星形和桥形等不同接线形式, 通过数学解析方法定量分析了谐波对保护动作值影响的程度, 发现大容量双星形或桥形集合式电容器在高幅值的合闸暂态谐波涌流作用下, 内部元件最大允许故障率大幅降低, 致使内部保护的实际行动值严重低于整定值, 从而易导致误动的发生; 依据分析结果提出了相应的预防措施。

关键词: 谐波; 集合式电容器; 内部故障保护; 误动作; 数学解析

Impact of harmonics on the internal fault protections of assembling capacitor

MA Liang¹, QIAN Luo-jiang²

(1. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;
2. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In realistic operation, assembling capacitors have been found that the mal-actions of its internal fault protection are more than ones of ordinary shunt capacitor bank and the maloperation rate becomes higher with the increase of the capacity. With the configuration characteristic and the protective setting principle, this paper elucidates the reason of mistake actions via analyzing the change of maximum fault element limit number under the influence of harmonics. By the mathematical analysis, the magnitudes of harmonics impacting on relay actions are deduced for single star, dual-star and bridge connections respectively. As a result, in the switching-on transient duration, a high magnitude of harmonic rush current can cause the considerable decrease of maximum fault element limit and make the actual protective action value much lower than the setting specially for those high capacity of dual-star or bridge connections which internal protection easily occur mal-action. The paper also presents corresponding measure against the mal-operation according to the analysis results.

Key words: harmonics; assembling capacitor; internal fault protection; mal-action; mathematical analysis

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0087-04

0 引言

并联电容器是电力系统中主要的无功补偿设备, 而集合式并联电容器因其具有占地小、容量大、免维护等特点, 近十多年来在电力系统、特别是在配电网中已逐渐取代普通电容器, 成为使用最广泛的电气设备之一^[1-4]。但是, 该设备在实际运行中也暴露出一些问题, 其中主要的问题就是易受谐波环境的影响^[5]。

众所周知, 容量越大的电容器对高次谐波放大效应越强。具体到大容量的集合式电容器, 在放大的谐波电压和谐波电流作用下, 不仅使用寿命因绝缘加速老化而缩短^[6], 而且设备继电保护装置的可靠性也受到严重影响^[7], 进而影响了系统的运行

安全。

谐波对集合式电容器保护影响最显著的是导致其内部故障保护误动作, 尤其是双星形接线或桥形接线形式的大容量集合式电容器, 在使用一段时期后易出现因内部故障保护装置误动作而不能合闸投入运行的现象, 这种现象在全国各地均多次发生且有趋于频繁的趋势。因此, 针对该问题进行深入研究并探索解决方案是一个十分迫切的课题。

本文首先阐述了各种不同接线形式集合式电容器内部故障保护动作整定值设置的基本法则, 在此基础上应用数学解析法推导了谐波对内部保护实际行动值影响的定量分析式, 最后根据分析结果提出相应的对策和措施。

1 集合式电容器内部故障保护动作整定值

集合式并联电容器均以三相星形连接，按容量大小又分为三种结构类型^[8]：单星形结构、双星形结构和桥形结构。接线形式如图 1 所示，其中 L 为串联电抗器。

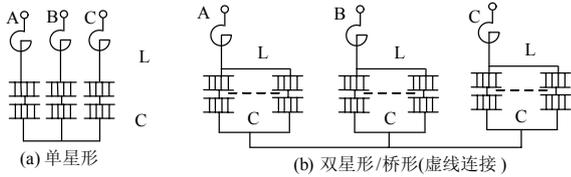


图 1 集合式电容器的三种接线结构

Fig.1 Three connections of assembling capacitor

单星形结构集合式电容器每相包括一个串段组，每组包括 4 或 6 个串段，每个串段又由数以百计的带有熔丝的小电容元件并联而成；双星形和桥形结构的集合式电容器接线形式类似，即每相包括两个并联的串段组，区别在于桥形结构将两组的中心连接起来。

无论什么结构形式，当一个串段中有部分小元件因故障由熔丝熔断切除后，只要电容的容值偏差造成的该串段电压升高未超过其介质绝缘的稳态过电压倍数限值，设备仍可持续运行，无需对设备进行停运维修。

显然，一个串段允许切除小元件数量的最大值（以串段最大允许元件故障率表示，记为 Pf_{max} ）取决于电容器的稳态过电压倍数限值（记为 K_V ）。 Pf_{max} 参数非常重要，它是各种集合式电容器内部故障保护整定值设置的基本依据^[9]，由电路基本理论不难推得

$$Pf_{max} = \frac{3k_v N - 3N}{3k_v N - 2k_v} \quad (1)$$

式中 N 为一个串段组的串段数。

根据相关的行业技术规程^[10]，电容器设备稳态过电压倍数限值为 1.1 pu，有些设备制造厂家实际增强了产品绝缘介质强度，将稳态过电压倍数限值提高至 1.15 pu。分别令 $N=4$ 和 $N=6$ ，由式 (1) 得

$$N = 4 \begin{cases} k_v = 1.1 & Pf_{max} = 0.109 \\ k_v = 1.15 & Pf_{max} = 0.156 \end{cases} \quad (2)$$

$$N = 6 \begin{cases} k_v = 1.1 & Pf_{max} = 0.102 \\ k_v = 1.15 & Pf_{max} = 0.146 \end{cases} \quad (3)$$

对于单星形结构的集合式电容器，内部故障保

护采用零序电压 $3U_0$ 作为保护动作整定值。 $3U_0$ 保护又分为开口三角电压和相电压差动两种保护接线方式，因开口三角电压保护易受三相不平衡影响而误动，故本文以相电压差动作为 $3U_0$ 保护动作整定值的计算依据，如图 2(a)所示。

对于双星形和桥形结构的集合式电容器，内部故障保护分别采用不平衡电流 I_0 和桥差电流 I_{diff} 作为保护动作整定值，如图 2(b)、(c)所示。

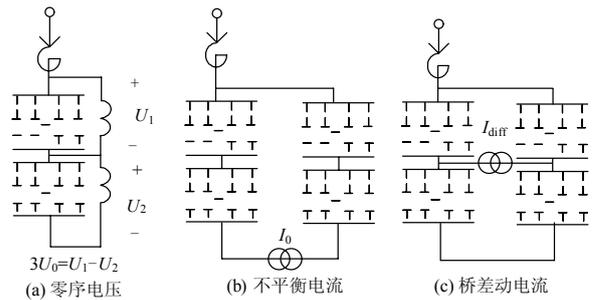


图 2 不同结构集合式电容器的内部故障保护方式

Fig.2 Internal fault protections for different capacitors

以设备安装点母线的额定相电压和电容器额定电流为基准值，并设串联电抗率 $K_L = \omega^2 LC$ ，经过复杂的三相等效电路公式推导，分别得出以标幺值 (pu) 形式表示的内部故障保护动作整定值的计算公式如下：

单星形结构零序电压保护动作整定值

$$3U_{0(pu)} = \frac{3Pf_{max}}{3N(1 - Pf_{max})(1 - K_L) + 2Pf_{max}} \quad (4)$$

双星形结构不平衡电流保护动作整定值

$$I_{0(pu)} = \frac{3Pf_{max}}{12N(1 - Pf_{max})(1 - K_L) + 10Pf_{max} - 6K_L Pf_{max}} \quad (5)$$

桥形结构桥差动电流保护动作整定值

$$I_{diff(pu)} = \frac{3Pf_{max}}{6N(1 - Pf_{max})(1 - K_L) + 8Pf_{max} - 6K_L Pf_{max}} \quad (6)$$

2 谐波对内部故障保护动作值的影响

由于集合式电容器内部故障的保护继电器动作整定值都很小，所以对谐波影响的反应通常比外部故障保护继电器更敏感^[11]。保护继电器一般为电磁型，以下分述谐波对各种保护动作的影响。

1) 谐波对单星形相电压差动保护的影响

继电器动作转矩与线圈电流的平方成正比，高次谐波使线圈阻抗增加，线圈电流减小，减小值为

$$\Delta I = \frac{U_{s\phi}}{k\omega L_{jd}} \left(\sqrt{1 + \sum_n h_{(n)}^2} - \sqrt{1 + \sum_n \frac{h_{(n)}^2}{n^2}} \right) \quad (7)$$

式中: k 为 PT 一次侧到继电器线圈的电压综合变比; L_{jd} 为继电器线圈的电感; $U_{s\phi}$ 为母线额定相电压; $h_{(n)}$ 为差动电压中 n 次谐波含量标么值 (pu)。

要使继电器按工频整定值动作, 据式 (7) 得此时的动作电压 (标么值 pu) 应为

$$V'_{cd} = \sqrt{1 + \sum_n \frac{h_{(n)}^2}{n^2}} \quad (8)$$

又根据式 (1) 得此时的最大允许元件故障率

$$P'_{fmax} = \frac{3N(1-K_L) \sqrt{1 + \sum_n \frac{h_{(n)}^2}{n^2}}}{3N(1-K_L) + 3 - 2 \sqrt{1 + \sum_n \frac{h_{(n)}^2}{n^2}}} \quad (9)$$

与无谐波时的最大允许元件故障率相比, 得

$$\frac{P'_{fmax}}{P_{fmax}} = \frac{[3N(1-K_L) + 1] \sqrt{1 + \sum_n \frac{h_{(n)}^2}{n^2}}}{3N(1-K_L) + 3 - 2 \sqrt{1 + \sum_n \frac{h_{(n)}^2}{n^2}}} \quad (10)$$

假如系统中分别只单独含有 3、5、7 次谐波, 再分别令 $K_L=4.5\%$ 、 6% 、 12% , 由式 (10) 得出 P'_{fmax}/P_{fmax} 与 $h_{(3)}$ 、 $h_{(5)}$ 、 $h_{(7)}$ 的关系如图 3(a)、(b)、(c) 所示。

由式 (10) 及图 3 可知, 在保护动作整定值不变情况下, 谐波使最大允许元件故障率 P_{fmax} 增大, 这使实际动作值大于整定值, 可能导致保护拒动, 但影响程度甚微 (谐波电压严重时 P_{fmax} 增大也不超过 0.5%), 且与串段数 N 和串抗率 K_L 的关联度不密切。因此, 单星形结构集合式电容器因谐波造成相电压差动保护拒动的现象很少发生。

2) 谐波对双星形不平衡电流保护的影响

依然假设系统中只单独含有 n 次谐波, 同时考虑到无论是对工频还是谐波, 不平衡电流与电容器支路电流的关系表达式是相同的, 分别计算一相中两条分支的电流可得出包括了谐波的不平衡电流 (标么值) 为

$$I'_0 = \sqrt{I_0^2 + I_{0(n)}^2} = \frac{P_f}{4N(1-P_f) + 2P_f} \sqrt{1 + I_{C(n)}^2} \quad (11)$$

式中: I_0 为不平衡工频电流; $I_{0(n)}$ 为不平衡谐波电流; $I_{C(n)}$ 为电容器支路谐波电流 (相电流); 各量均为标

么值 pu。

假如动作值按工频整定, 即 $I'_0 = I_0 = 1$, 且令 $P_f = P_{fmax}$ 并认为式 (11) 等号右边分母项在有谐波影响 (P'_{fmax}) 和无谐波影响 (P_{fmax}) 时相差甚微, 则由式

(11) 得出这时最大允许元件故障率的变化为

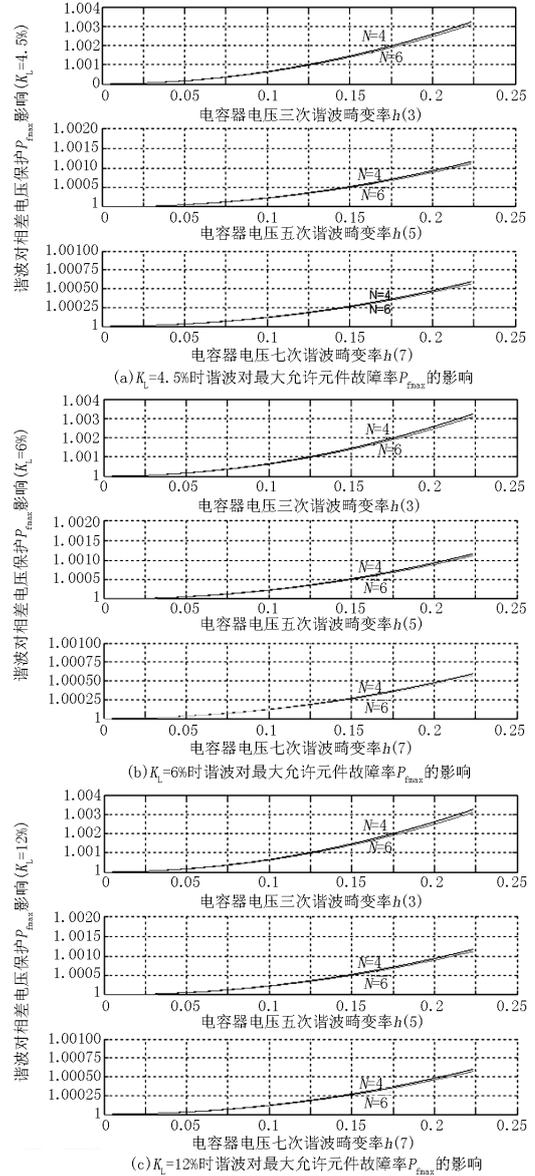


图 3 谐波对相电压差动保护的影响

Fig.3 Impact on phase voltage differential protection

$$\frac{P'_{fmax}}{P_{fmax}} = \frac{1}{\sqrt{1 + I_{C(n)}^2}} \quad (12)$$

由式 (12) 得出的 $\frac{P'_{fmax}}{P_{fmax}}$ 与支路谐波电流 $I_{C(n)}$ 的

关系如图 4 所示。

从图 4 可看出,在保护动作整定值不变情况下,谐波影响使最大允许元件故障率 P_{fmax} 减小,实际动作值小于整定值,可能导致保护误动,并且影响程度相当显著。如果进一步考虑到大容量电容器本身对支路谐波电流 $I_{C(n)}$ 的高倍数放大效应,则问题愈加严重。即使电容器内部的故障小元件数量未达到其正常运行环境下的最大允许值 P_{fmax} ,但却很容易超过谐波环境下的最大允许值 P'_{fmax} ,致使在谐波的作用下发生保护动作现象。

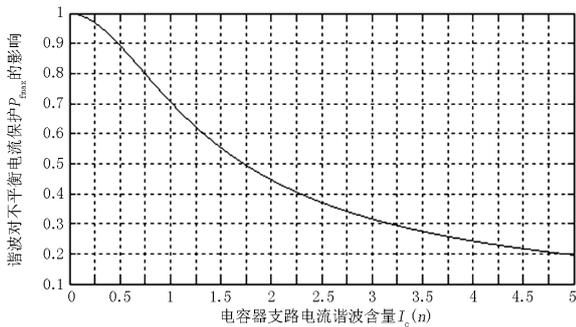


图 4 谐波对不平衡电流保护的影响

Fig.4 Impact on unbalanced current protection

3) 谐波对桥形桥差动电流保护的影响

虽然与双星形接线相比,桥差动工频电流分量和谐波电流分量均大了近一倍,但两个分量之间的相对关系与双星形接线情况相同,所以公式(12)和图 4 的结论完全适用桥形结构的集合式电容器桥差动电流保护。

3 预防措施

鉴于谐波对单星形结构集合式电容器相电压差动保护的影响很小,所以本文仅针对双星形结构的不平衡电流保护探讨预防误动措施(桥差动电流保护同理)。

最常见的保护误动现象发生于电容器合闸时,这是由于合闸涌流中频次为 $n=1/\sqrt{K_L}$ 的暂态谐波含量 $I_{C(n)}$ 可高达 $5\sim 6 pu^{[12]}$,由图 4 可看出,此时的最大允许元件故障率 P'_{fmax} 降低到不足正常值 P_{fmax} 的 20%。根据式(2)、(3), $P'_{fmax} \approx 0.02$,也就是说,当电容器的一个串段中有 2%小元件故障切除后,尽管理论上远未达到设备的设计使用期限,但实际上已无法合闸投入运行了。

解决问题的途径有两条:一是将内部保护动作值和动作延时与外部过流保护相关联,如图 5 所示,以避免暂态谐波的影响;二是采用带有数字滤波的电子型继电器作为内部保护装置。

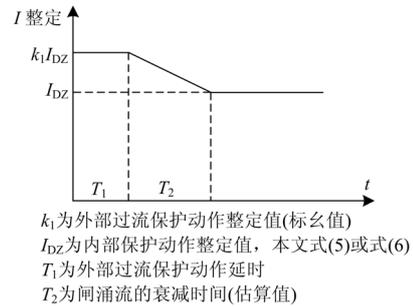


图 5 内部保护与外部保护的配合

Fig.5 Cooperation between internal and external protection

4 结语

本文全面分析了谐波对集合式电容器内部故障保护的影响,探明了双星形和桥形结构电容器内部保护误动现象频发的原因并提出了相应的预防措施。

参考文献

- [1] 王耀, 贾申龙. 集合式电容器在我国中心枢纽变电站的应用[J]. 电力设备, 2004, 5 (9): 14-17.
WANG Yao, JIA Shen-long. Application of assemble type capacitor in central hub substation in China[J]. Electrical Equipment, 2004, 5 (9): 14-17.
- [2] 李晶明. 浅谈集合式电容器的应用[J]. 电力电容器, 2002, 23 (2): 33-37.
LI Jing-ming. Brief discussion on application of the assembling capacitor[J]. Power Capacitors, 2002, 23(2): 33-37.
- [3] 刘水平. 集合式电容器的发展与改进[J]. 电力电容器, 2006, 27 (1): 1-4.
LIU Shui-ping. Development and improvement of assembling capacitor[J]. Power Capacitors, 2006, 27(1): 1-4.
- [4] Cavallini A, Mazzanti G, Montanari G C, et al. Design of shunt capacitor circuits for power factor compensation in electrical systems supplying nonlinear loads: a probabilistic approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998: 675 - 681.
- [5] 谭劲. 谐波对并联电容器的影响及抑制对策[J]. 西华师范大学学报:自然科学版, 2005, 26 (2): 187-190.
TAN Jin. The affectation of harmonic upon the parallel capacitor bank and countermeasures[J]. Journal of Xihua Teachers College: Natural Science, 2005, 26 (2): 187-190.
- [6] 张大立. 一起大容量集合式电容器事故浅析[J]. 高电压技术, 1995, 21 (3): 55-56.
ZHANG Da-li. Discussion on the accident of a big capacity assembling shunt capacitor[J]. High Voltage Engineering, 1995, 21 (3): 55-56.

(下转第 118 页 continued on page 118)

性能稳定可靠,能满足对电子式互感器的校验要求。

参考文献

[1] 郭志忠. 电子式互感器评述[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (15): 1-5.
GUO Zhi-zhong. Review of electronic instrument transformers[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (15): 1-5.

[2] 罗承沐, 张贵新, 王鹏. 电子式互感器及其技术发展现状[J]. 电力设备, 2007, 8 (1): 20-24.
LUO Cheng-mu, ZHANG Gui-xin, WANG Peng. Electronic type instrument transformer and its present technical development manner[J]. Electrical Equipment, 2007, 8 (1) : 20-24.

[3] 杨慧霞, 郭伟, 邓迎君. 几种电子式互感器校验方式的研究和比较[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 99-101.
YANG Hui-xia, GUO Wei, DENG Ying-jun. Study and comparison on several different electronic transformer calibration methods[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (22): 99-101.

[4] 陈俊, 叶利, 申莉. 电子式互感器现场误差校准装置的研制[J]. 电测与仪表, 2009, 46 (526): 31-34.
CHEN Jun, YE Li, SHEN Li. Development of the field error calibrator equipment for electronic transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46

(526): 31-34.

[5] 张蓬鹤, 何俊佳. 电子式互感器误差校验装置的研究[J]. 电测与仪表, 2009, 46(1): 57-60.
ZHANG Peng-he, HE Jun-jia. Research for electronic instrument transforms error calibration device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(1): 57-60.

[6] 李开成, 李振兴, 易杨. 电子式互感器校验系统的研究[J]. 电测与仪表, 2009, 46(527): 43-51.
LI Kai-cheng, LI Zhen-xing, YI Yang. Study on calibration system for electronic instrument transformers [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(527): 43-51.

[7] Lyons R G. Understanding digital signal processing [M]. Second edition. Beijing: China Machine Press, 2006.

收稿日期: 2010-03-11; 修回日期: 2010-04-15

作者简介:

张明珠 (1976-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为概率统计及计算机应用; E-mail: zmz_xctc@126.com

李开成 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电子式互感器, 电能质量分析及电磁测量与仪器等方面的研究;

李振兴 (1977-), 男, 博士, 研究方向为电力系统继电保护与控制, 数字化变电站技术。

(上接第 90 页 continued from page 90)

[7] Blooming T M. Capacitor failure analysis: a troubleshooting case study[C].//Cement Industry Technical Conference. 2005: 345-356.

[8] 许跃进. 电容器组的容差分析与保护设计[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(12): 5-8.
XU Yue-jin. Capacitance error analysis of power capacitor group and protection design[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(12): 5-8.

[9] 杨宏. 集合式并联电容器内部故障保护的整定[J]. 电力电容器, 2006, 27 (3): 6-7, 15.
YANG Hong. Rounding off the internal fault protection of assembling shunt capacitor[J]. Power Capacitors, 2006, 27 (3): 6-7, 15.

[10] DL5014-92 330-500 kV 变电所无功补偿装置设计技术规定[S]. 北京: 中华人民共和国能源部, 1993.
DL5014-92 330-500 kV technical regulation for designing of reactive for 330-500 kV substations[S]. Beijing: Ministry of Energy, China. 1993.

[11] 程浩忠, 艾芊, 张志刚, 等. 电能质量[M]. 北京: 清华

大学出版社, 2006.
CHENG Hao-zhong, AI Qian, ZHANG Zhi-gang, et al. Electrical power systems quality[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

[12] 邓雨荣. 无功补偿电容器合闸过电压及涌流的仿真计算[J]. 广西电力, 2006, 29 (6): 6-9.
DENG Yu-rong. Simulated calculation of overvoltage and surge current at switch-on of capacitor for reactive power compensation[J]. Guangxi Electric Power, 2006, 29 (6): 6-9.

收稿日期: 2010-03-08; 修回日期: 2010-04-24

作者简介:

马亮 (1971-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

钱路江 (1961-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行、控制及数字仿真技术。E-mail: ljqian@whu.edu.cn