

IEEE 电容器组保护新理念及 对我国标准制定工作的启示

梁 琮

(桂林电力电容器有限责任公司, 广西壮族自治区 桂林市 541004)

New Idea in IEEE Guide for Protection of Shunt Capacitor Banks and Its Enlightenment for Working out Related Standards in China

LIANG Cong

(Guilin Power Capacitor Co. Ltd., Guilin 541004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

ABSTRACT: The protection for shunt capacitor bank with internal fuse and its application are still blank in current domestic standards in China. In this paper, main contents and features of IEEE C37.99-2000, i.e., the IEEE Guide for Protection of Shunt Capacitor Banks, and several new ideas reflecting unbalance protection technique for modern capacitor bank with internal fuse are presented in order that to propose the organization that works out standards to draw lessons from advanced capacitor bank protection technique abroad and to revise related domestic standards in the protection for traditional capacitor bank with external fuse. In IEEE C37.99-2000 the capacitor bank with internal fuse is regarded as one of four typical capacitor configurations and it is put forward that the maximum fused number of internal fuses should be regarded as an important criterion for the setting of the trip of unbalance protection as well as the immediate trip under arc short-circuit should be regarded as an important condition for setting the time-delay of unbalance protection to establish the quick reaction mechanism for internal fault occurred in capacitor bank with internal fuse. Thus, it is proposed to alarm after one or two internal fuses are fused in order that to replace them during the scheduled maintenance to remedy the defects existing in unbalance protection.

KEY WORDS: power capacitor; protection; unbalance protection; setting method; reliability analysis

摘要:我国现行标准在内熔丝电容器组的保护和应用方面仍是空白,文章对 IEEE C37.99-2000《IEEE 并联电容器组保护导则》的主要内容和特点,尤其是反映现代内熔丝电容器组不平衡保护技术的若干新理念作了介绍,旨在建议标准制定组织借鉴国际先进电容器组保护技术,尽快修订传统的外熔丝电容器组保护的相关国内标准。《导则》将内熔丝电容器组作为 4 类典型的电容器配置之一,提出应以“内熔丝最

大开断根数”作为不平衡保护跳闸整定的重要判据、以“弧光短路立即跳闸”作为不平衡保护跳闸延时取值的重要条件来建立内熔丝电容器组内部故障快速反应机制,提出应在内熔丝开断 1~2 根后发出报警信号以便在计划检修时进行更换,以弥补不平衡保护存在的“漏洞”。

关键词: 电力电容器; 保护; 不平衡保护; 整定方法; 可靠性分析

0 引言

1 kV 及以上电容器单台保护用外熔丝由于结构简单、能提供直观的故障位置,在北美已经有 70 多年的应用历史,而且在全世界范围内建立了以此为基础的电容器相关标准^[1-16]。自内熔丝电容器推出以来,由于内熔丝不受气候、小动物、机械力等外界因素影响,使用寿命长、性能稳定,并且具有故障点能量注入少、减小了电容器箱壳爆炸可能性等优势,因此在高压、超高压大型电容器组中得到了广泛应用。220~500 kV 直流输电工程换流站中的大型电容器组几乎全部采用内熔丝电容器,这既是对内熔丝电容器优异性能的认同,也是电容器进入“内熔丝电容器时代”的主要标志。

电气电子工程师学会(the Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)是北美外熔丝电容器组技术的长期倡导者,在内熔丝电容器技术进步的推动下,IEEE 电容器标准即时适应电容器技术的变化,并率先为内熔丝电容器组和无熔丝电容器组保护建立了较为完整的指导性文件——IEEE C37.99-2000《IEEE 并联电容器组保护导则》^[17](以下简称《导则》)。

GB/T 11024.1-2001^[18]是我国目前较新、较权威的电容器标准,且等效于 IEC 60871-1:1997。GB/T 11024.1-2001 仅对内熔丝电容器单元本身作了技术要求,在内熔丝电容器组的保护和应用方面仍是空白,外熔丝的配置仍是针对所有电容器。按照现行标准,仍会将内熔丝电容器当作普通电容器,内熔丝电容器的个性要求仍然得不到合法保护。除此之外,我国还存在大量交叉的相关电容器标准^[8-16],这些标准的覆盖面主要是电容器组的应用,而恰恰在应用上误导了内熔丝电容器组的应用。

本文旨在建议标准制定组织借鉴国际先进电容器组保护技术,尽快修订传统的外熔丝电容器组保护的相关国内标准,以结束处于内熔丝电容器时代的内熔丝电容器组缺乏可靠保护的局。

1 《导则》简介

《导则》是一份为电容器组保护的配置和整定提供指导的技术文件。它为大多数电容器的应用、设计提供可靠的保护方法,还包含了滤波电容器组和大型 EHV 电容器组的保护。随着内熔丝技术的进步和普及,近 10 年来外熔丝电容器组一统天下的局面已经被“内熔丝电容器时代”所取代,IEEE 中内熔丝电容器组相关的不平衡保护整定原则、计算方法也在悄然发生变化。2000 版《导则》较 1990 版《导则》有了较多的变化和补充:除了附录有较大的变化外,有明显变化的是与并联电容器、滤波电容器组保护整定、计算方法相关的条款;另一个变化是使本《导则》能体现现代技术的外熔丝电容器组、内熔丝电容器组、无熔丝电容器组以及非熔丝电容器组保护的相关条款。

2 IEEE 电容器组保护的新理念

2.1 为内熔丝电容器组保护建立完整的指导性文件

电容器组能否避免“毁灭性”打击取决于保护的有效性。要构筑起电容器组的“马其诺防线”,必须针对电容器组的故障特征采取相应的措施。

内熔丝电容器已经有 50 多年的历史,与外熔丝相比,尽管内熔丝有故障位置不明显、保护不反应极对壳绝缘故障的不足,但仍在诸多方面显示出性能上的优势。也正是这些优势,为内熔丝电容器的长足发展打下了坚实的基础。

外熔丝、无熔丝电容器组单元内部故障呈大面积短路状态,而内熔丝电容器组单元内部故障呈小范围开路状态,由此导致内熔丝电容器对内部故障保护灵敏度有极苛刻的要求:

(1) 内熔丝电容器允许隔离元件引起的电容量变化比外熔丝隔离整台电容器要小得多,既要求比传统保护更灵敏,还要求满足初始不平衡值校验要求。

(2) 内熔丝电容器元件比单元整体过电压更早、更高,要求比传统保护提前启动。

(3) 能否形成具有足够可靠性的保护信号与接线方式密切相关,要求正确选择电容器组的一次接线方式。

根据电容器组一次接线电容器单元的拓扑结构配置外熔丝或内熔丝的特点对电容器组进行明确分类是《导则》最大、最有特色的亮点,也是《导则》反映最新电容器组现代保护技术的内容之一。除此之外,《导则》还从保护的角度对 4 类典型电容器组的特点进行了详细描述。内熔丝电容器组从此第一次以独立、合法的身份出现在电容器应用的历史舞台上。

《导则》并不包括在我国大量采用的内外熔丝并用的电容器组类型,如何确保安全需要深入研究。并且我国现行标准在内熔丝电容器组的保护和应用方面仍是空白,因此应为内熔丝电容器组保护建立完整的指导性文件。

2.2 “内熔丝最大开断根数”和“弧光短路”成为 IEEE 不平衡保护的最重要判据

内熔丝电容器组的内部故障除了由于内部元件被隔离而产生的健全元件过电压外,还有内熔丝开断失败(不动作或重燃)、单元过电压和单元内外绝缘击穿(弧光短路)等现象。

电容器单元(带电)极对壳击穿、套管闪络、内部连线短路、电容器单元间短路等都会形成弧光短路,弧光短路会在瞬间造成大面积损坏。通常电容器组中的弧光短路引起的相电流变化不足以使按 4~5 倍电容器组额定电流 I_n 整定的短路保护(通常是过负荷保护)动作,这就要求不平衡保护对于弧光短路有很高的灵敏性,尤其是电容器单元多串的电容器组。

《导则》认为内熔丝电容器组不平衡保护跳闸的任务至少应包含如下内容:①有可能出现弧光短路或箱壳爆破时立即动作于跳闸(最重要的任务);②有可能超过内熔丝的最大开断根数时动作于跳闸;③有可能超过元件的暂态过电压能力时动作于跳闸;④健全单元在高于 $1.1U_n$ 的稳态过电压时动作于跳闸。

要保证不平衡保护跳闸的灵敏性,要在各种需要跳闸的边界条件中选择最小值作为整定值。《导则》在“跳闸动作值的取值”上明确要求:如果电

容器制造厂推荐最大内熔丝动作根数为 m (单元稳态过电压 $< 1.1U_n$)，为保证不平衡保护动作的可靠性，跳闸动作值要定在第 $m-1$ 根内熔丝动作不平衡信号值与第 m 根内熔丝动作不平衡信号值的中间值。

一方面，“内熔丝最大开断根数”与“元件最大过电压能力”成为内熔丝电容器的两个性能指标；另一方面，“内熔丝最大开断根数”的临界状态可能更早出现。显然，《导则》在“跳闸动作值的取值”上的要求是假设不超过“内熔丝最大开断根数”在所有跳闸条件中取小的结果。跳闸动作值取中间值的办法为解决保护灵敏性问题提供了一种便捷的途径，也是与国内传统的保证保护灵敏性办法的重要区别。

要保证不平衡保护跳闸的速动性，显然要在各种需要跳闸的边界条件中选择最小时间值作为整定延时。《导则》对“跳闸延时的取值”的要求是：不平衡跳闸延时躲过涌流、系统接地、相邻设备的投切、合闸不同期。此外，跳闸延时还应考虑与单个内熔丝在没有并联元件能量注入时熔化时间(电容器单元制造厂应提供该内熔丝的最大熔断时间)的配合，通常，该配合延时可取 $0.01\sim 0.05\text{ s}$ 。加上跳闸继电器、断路器等固有延时，开断电容器单元内部短路或电容器组外部短路的总时间最短也要达到 0.1 s ，但仍然会导致重大破坏。电容器组局部破坏一旦开始，很快就会升级，增加大面积破坏或火灾的危险。跳闸延时应收缩至最短，以使极对壳击穿或内熔丝失效时箱壳爆破的可能性达到最小。 $0.01\sim 0.05\text{ s}$ 的跳闸延时是不平衡保护实现击穿、短路保护的最根本体现，也反映了《导则》在权衡电容器短路故障和延长电容器使用寿命时的侧重。

目前国内的内熔丝电容器不平衡保护整定计算仅以防止健全元件长期过电压突破极限作为主要内容，延时通常按 0.5 s 整定，最短按 0.2 s 整定。长期以来，国内相关标准对内熔丝电容器单元内外绝缘击穿(弧光短路)保护没有给予足够重视，也没有相关论述和规定。

基本判据的确定，明确了制造厂与用户在不平衡保护上的接口。《导则》首次明确了制造厂应履行的新义务：应提供内熔丝的最大开断根数和最大熔断时间。

2.3 计划更换“内熔丝动作单元”

早期的电容器只有几千 var，外熔丝在隔离击穿的电容器时损失的容量少。现代的电容器一个元件相当于从前的电容器单元，因此用内熔丝保护每个

独立的元件是合理的。内熔丝电容器将外熔丝电容器保护理念应用到电容器单元中，给每个电容器元件加上一个内熔丝，使电容器单元的可靠性大大提高。内熔丝动作后，故障被隔离在一个元件范围内，单元各项参数变化约为 $1\%\sim 2\%$ ，不影响继续使用。

正是由于一根内熔丝动作后单元参数的变化很小，使得下一根内熔丝动作位置的随机性更加明显，完全有可能出现在对称位置上。一旦出现这种情况，将会瓦解所有为建立内熔丝电容器组内部故障快速反应机制而做出的努力。

《导则》指出，不平衡报警的任务就是弥补不平衡保护出现对称故障时无法正确判断的缺陷，确保跳闸任务的可靠实现。报警越早，在计划停运期间恢复电容器组的机会越大、元件进一步失效和非计划停运的可能性越小。报警误动会增加消耗、降低电容器组保护的可靠性。该报警应该在故障电容器被更换后才能手动复归。

2.4 重视初始不平衡分析

为保证保护的安全性，即在“不该动作时不误动作”，通常要对开口电压保护继电器整定值进行初始不平衡校验。按国内保护整定规程、规范的一般要求^[8-16]，对于保护继电器整定值，通常按下式整定：

$$U_{dz,j} \geq K_K U_{\Delta bp}$$

式中： $U_{dz,j}$ 为开口三角电压保护继电器整定值； $U_{\Delta bp}$ 为初始不平衡值； K_K 为计及不可预见因数而引进的可靠系数，可按 $1.3\sim 1.5$ 考虑。

实际上，由于内熔丝电容器组不平衡保护的整定值很小，加上由于一、二次设备的制造偏差和系统不平衡等因素产生的初始不平衡的客观存在，仅按 $1.3\sim 1.5$ 考虑可靠系数是不能避免保护误动的。

《导则》认为，初始不平衡主要来自(存在于所有电容器组，无论带或不带熔丝)系统电压不平衡和电容器制造偏差，其次来自于互感器的偏差和电容温度系数偏差。初始不平衡可能会使保护拒动，也可能使保护误动。

考虑到初始不平衡值的影响，不平衡报警动作应整定为理想电容器组不平衡报警计算信号值的一半。当初始不平衡误差接近报警动作值的 50% 时，应采取校正或消除电容器组和系统产生的初始不平衡。

有时，仔细斟酌电容器组的一次接线可以不补偿而改善灵敏度。例如，将电容器组从单星形分成双星形，保护的灵敏度可提高一倍，并可消除系统电压不平衡的影响。

由于电容器组接线方式设计、熔丝配合、互感器的选择都将直接影响保护方案的灵敏性和及时性,所以电容器组的设计应进行保护的初始不平衡值和误差分析。大多数电容器装置都应进行专门的工程分析以确定最佳保护方案。

不平衡保护可靠性分析不但是评价不平衡保护优劣的重要指标之一,也是评价电容器组优劣的重要指标之一。不平衡保护可靠性分析实质上是要在一次接线设计之初对保护动作取值与初始不平衡值之间存在的倍数大小进行分析、评价。不平衡保护可靠性高低不但决定了保护不误动、不拒动,能安全、稳定运行的程度,也成为不同物理量(如电流、电压)保护间具有可比性的指标。《导则》虽然没有对电容器组不平衡保护可靠性分析进行专门、详细的叙述,但也明确指出了进行电容器组不平衡保护可靠性分析的重要性。

要进行电容器组不平衡保护可靠性分析,必须先对初始不平衡值进行分析。《导则》对初始不平衡的产生进行了较为详细的描述,还提供了部分保护方式的初始不平衡值估算公式。

2.5 采用数据表反映内熔丝电容器组不平衡状态

针对各种(3组)电容器组接线方式,《导则》详细列出了不同内熔丝动作根数对应的健全元件电压、健全单元电压、不平衡保护信号值等计算公式及计算举例,为不平衡保护的理解和应用提供了帮助。限于篇幅,这里仅以H型桥差内熔丝电容器组不平衡保护计算为例,介绍《导则》中的计算公式

及结果。图1是一个典型的H型桥差电容器组单相接线示意图,桥臂不但上下、左右不对称,且每桥臂由多分支组成。

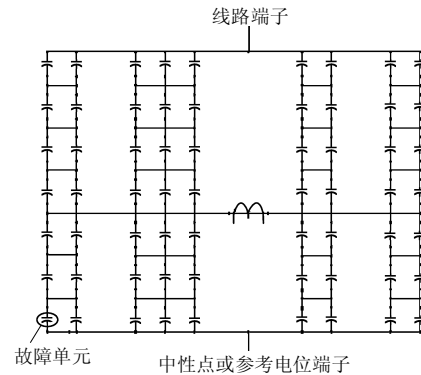


图1 桥差接线电容器组单相示意图
Fig. 1 Illustration of one leg of an H-bridge capacitor bank

对于具有内熔丝电容器的H型桥差保护,根据电容器内部结构、电容器组接线方式以及中性点接地方式的不同,各个参数变化是不同的。表1以一个特定的电容器单元和特定的电容器组为例,计算各个参数随内熔丝动作的变化情况。表2给出了各参数的含义及计算公式。电容器内部结构如下:并联元件数/串段 $N=16$; 串段数/单元 $S_u=3$ 。电容器组结构如下:总串联台数 $S=7$; 中性点侧桥臂串联台数 $S_s=3$; 并联台数/相 $P_t=9$; H桥臂左侧并联台数 $P_a=5$; 故障串并联台数 $P=2$; $G=1$, 其中0表示“接地”,1表示“不接地星形”。

表1 图1接线(单元内部元件16并3串)不平衡计算清单

Tab. 1 Spreadsheet illustrating unbalance calculations for the configuration of Fig. 1 with individual capacitors having 16 parallel elements in each of 3 series groups

f	C_u	C_{ln}	C_p	V_{ln}	V_h	I_h	V_{cu}	V_e	I_u
0	1	3	1.285 7	1.000	0.428 57	0	0.848	1	1
SE	1.5	3.048	1.294 4	0.998	0.424 72	-0.006 98	0.848	0	1.27
1	0.978	2.998	1.285 3	1.000	0.428 77	0.000 36	1.008	1.052	0.99
2	0.955	2.995	1.284 8	1.000	0.428 99	0.000 76	1.017	1.109	0.97
3	0.929	2.992	1.284 2	1.000	0.429 24	0.001 21	1.026	1.173	0.95
4	0.900	2.989	1.283 6	1.001	0.429 51	0.001 71	1.037	1.245	0.93
5	0.868	2.985	1.282 9	1.001	0.429 82	0.002 27	1.050	1.326	0.91
6	0.833	2.980	1.282 1	1.001	0.430 18	0.002 92	1.064	1.418	0.89
7	0.794	2.975	1.281 2	1.001	0.430 59	0.003 66	1.080	1.525	0.86
8	0.750	2.970	1.280 1	1.001	0.431 06	0.004 52	1.099	1.648	0.82
9	0.700	2.963	1.278 9	1.002	0.431 62	0.005 54	1.121	1.794	0.78
10	0.643	2.955	1.277 4	1.002	0.432 28	0.006 75	1.147	1.967	0.74
11	0.577	2.945	1.275 6	1.003	0.433 09	0.008 21	1.180	2.178	0.68
12	0.500	2.933	1.273 3	1.003	0.434 08	0.010 04	1.219	2.439	0.61
13	0.409	2.918	1.270 5	1.004	0.435 35	0.012 35	1.270	2.771	0.52
14	0.300	2.899	1.266 7	1.005	0.437 02	0.015 40	1.337	3.208	0.40
15	0.167	2.872	1.261 6	1.006	0.439 30	0.019 59	1.428	3.809	0.24
16	0.000	2.833	1.254 1	1.008	0.442 62	0.025 71	1.562	4.686	0.00

注:“SE”表示熔丝动作前元件短路。

表 2 表 1 参数计算公式及说明
Tab. 2 Calculation formula and illumination of parameters in Tab. 1

参 数	公 式 及 说 明
熔丝熔断根数 f	$f = 0$ 为正常运行, $f = SE$ 为熔丝熔断前的元件短路状态。
故障单元电容(标么值) C_u	$C_u = S_u \cdot (N - f) / [(N - f)(S_u - 1) + N]$
桥臂对中性点或所在相参考点电容(以单元电容为基准的标么值) C_{in}	$C_{in} = (C_u + P - 1)P / [(C_u + P - 1)(S_i - 1) + P] + (P_i - P) / S_i$
故障相两端电容(以单元电容为基准的标么值) C_p	$C_p = C_{in} P_i / [C_{in}(S - S_i) + P_i]$
故障相电压(标么值) V_{in}	$V_{in} = 1 + G\{3/2 + C_p / C_p(0) - 1\}$, 中性点接地或三角形接线时 $G = 0$, $V_{in} = 1$ 。 中性点不接地接线时, V_{in} 为中性点偏移后的电压。
故障臂电压(标么值) V_h	$V_h = C_p / C_{in}$
桥臂电流(以正常相电流为基准的标么值) I_h	$I_h = -V_{in}(S_i / S - V_h)[1 / (S - S_i) + 1 / S_i]S(P_i - P_u) / P_i$
故障单元电压(以正常单元电压为基准的标么值) V_{cu}	$V_{cu} = V_{in} V_h P S / [P + (S_i - 1)(C_u + P - 1)]$
健全元件电压(以正常元件电压为基准的标么值) V_e	$V_e = V_{cu} S_u N / [S_u(N - f) + f]$
故障单元电流(以正常单元电流为基准的标么值) I_u	$I_u = V_{cu} C_u$, 为便于估计内熔丝的最大熔断时间, SE 所对应的值给出元件击穿时熔丝熔断所需的工频电流。

3 结论

(1) 《导则》集中体现了国际现代电容器组保护技术, 为电容器组采用可靠、安全的保护提供了借鉴和参考。国内相关标准应借鉴《导则》的先进保护技术, 提高标准的技术水平。

(2) 《导则》将内熔丝电容器组作为 4 类典型的电容器配置之一, 这在国际专业标准上是首次。此外, 《导则》还对内熔丝电容器组进行了内容最丰富、篇幅最长的描述, 这不但反映了《导则》对内熔丝电容器组的重视, 也反映了内熔丝电容器组在实际应用中的地位。

(3) 《导则》提出, 应以“内熔丝最大开断根数”作为不平衡保护跳闸整定的重要判据、以“弧光短路立即跳闸”作为不平衡保护跳闸延时取值的重要条件, 建立内熔丝电容器组内部故障快速反应机制。

(4) 《导则》提出, 应在内熔丝开断 1~2 根后发出报警信号, 以便在计划检修时进行更换来弥补不平衡保护存在的“漏洞”。

(5) 《导则》不但进行了大量初始不平衡原因的分析, 提供了估算公式, 还提出了在设计之初进行可靠性工程分析的要求及判据, 是避免电容器组一次设计盲目性的有效措施。

(6) 《导则》对每一类典型电容器组的各种常用接线方式的不平衡保护都以表格的形式给出了计算公式, 并进行了举例计算。这不但便于对《导则》的理解, 便于对保护整定计算的评估, 也简化了对《导则》的宣贯。

参考文献

[1] IEEE Std 18-1992, IEEE standard for shunt power capacitors[S].

[2] IEEE Std 1036-1992, IEEE guide for application of shunt power capacitors[S].

[3] NEMA CP1-1988, Shunt capacitors[S].

[4] IEEE Std C62.22-1997, IEEE guide for the application of metal-oxide surge arresters for alternating-current systems[S].

[5] IEEE Std C37.90.1-1989 (Reaff 1994), IEEE standard for surge withstand capability (SWC) tests for protective relays and relay systems[S].

[6] IEEE Std C37.48-1997, IEEE guide for application, operation, and maintenance of high-voltage fuses, distribution enclosed single-pole air switches, fuse disconnecting switches, and accessories[S].

[7] IEC 60871-2:1999, Shunt capacitors for A.C. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 2: Endurance testing[S].

[8] DL/T 584-95, 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].

[9] DL 422-91, 高压并联电容器单台保护用熔断器订货技术条件[S].

[10] DL 5014-1992, 330~500 kV 变电所无功补偿装置设计技术规定[S].

[11] SDJ 25-85, 并联电容器装置设计技术规程[S].

[12] GB/Z 11024.3-2001(eqv IEC/TR 60871-3:1996), 标称电压 1 kV 以上交流电力系统用并联电容器第 3 部分: 并联电容器和并联电容器组的保护[S].

[13] GB 50059-1992, 35~110 kV 变电所设计规范[S].

[14] GB 15166.5-1994, 高压交流熔断器 并联电容器外保护用熔断器[S].

[15] GB 50227-1995, 并联电容器装置设计规范[S].

[16] GB 50053-1994, 10 kV 及以下变电所设计规范[S].

[17] IEEE C37.99-2000, IEEE guide for protection of shunt capacitor banks[S].

[18] GB/T 11024.1-2001(eqv IEC 60871-1:1997), 标称电压 1 kV 以上交流电力系统用并联电容器第 1 部分: 总则 性能、试验和定额 安全要求 安装和运行导则[S].



梁 琮

收稿日期: 2007-12-20。

作者简介:

梁 琮(1957—), 男, 教授级高级工程师, 长期从事电力电容器技术的研究和应用工作, E-mail: 653915309@qq.com。

(责任编辑 沈杰)