建议直流滤波电容器采用无内熔丝设计

无锡赛晶电力电容器有限公司 左强林，雷乔舒

摘要：本文从内熔丝直流滤波电容器的技术现状出发，肯定了直流输电技术的发展初期的采用内熔丝电容器的合理性；本文分析了目前直流滤波电容器普遍采用的内熔丝存在的问题，包括短路问题、开路问题及熔丝断口电阻下降等，提出要解决这些问题，直流滤波电容器应采用无内熔丝设计的建议。通过对无熔丝直流滤波电容器与保护的配合分析，提出直流滤波电容器更适合采用无内熔丝设计的观点，并对无内熔丝保护直流滤波电容器的运行状况做了肯定性的展望。

关键词：无内熔丝、直流滤波电容器、保护、应用、分析。

Proposed Adopt Fuseless Designing in DC Filter Capacitors

ZUO Qiang-lin, LEI Qiao-shu

Wuxi SUNKING Power Capacitor Co., Ltd

Abstract: From the technology present situation of the internal fused DC filter capacitor, this article confirmed that it is reasonable to adopt internal fused DC capacitors in the early time of HVDC technology developing. It is analyzed the current problems that commonly existed in the internal fused capacitors in DC filter capacitor in this paper, including short circuit, open circuit and the resistance of space the internal fuse burned decreased, etc., and put forward a proposal that to solve these problems, DC filter capacitor should be adopted fuse-less designing. It is put forward a point of view in this paper that the DC filter capacitor should more suitable to be adopted a fuse-less designing by analyzing the matching of the protection to the fuse-less DC filter capacitor and made a positive outlook on the operation situation of fuse-less DC filter capacitor.

Key Words: Fuseless, DC Filter Capacitor, Protection, Application, Analysis.

1、前言

目前国内的直流滤波电容器大都采用内熔丝保护，与 H 型接线、桥式不平衡电流保护配合。这种保护配置基本上是直接将交流电容器的保护方式直接移植到直流滤波电容器保护中应用的结果。这在当时的技术背景下存在一定的合理性，特别是直流滤波电容器的技术不成熟，运行故障频发的背景下是不得已而为之的[1]~[7]，后文将做进一步分析。直流滤波电容器的保护原来采用三段式保护，即：报警、报警并延时 2h 跳闸和立即跳闸。随着电容器保护逻辑的合理化改进，直流滤波电容器的保护存在诸多误动情况[8]~[10]，如三常工程、宁东±660kV 工程和南网高肇工程、兴安工程等。为此，国家电网公司调度中心专门组织相关厂家开会，讨论直流滤波电容器采用只报警、不跳闸保护的可行性。经过讨论，确

定直流滤波电容器可以采用只报警不跳闸的保护方式，这在目前的技术背景下也是相对合理的。

从直流滤波电容器的保护方式来看，目前基本上有两种方式：一是采用 II 型接线，双支路电流横差不平衡电流保护，如云广工程[7]和葛洲坝-上海直流输电工程[4]等。采用 II 型接线的优点是，出现一个元件击穿时，完好元件串联段上的电压升高较小，只有 H 型接线的一半，有利于电容器运行。缺点是：对两个支路的电容配平要求较高。二是采用 H 型接线，桥差不平衡电流保护。两者的优缺点对比如表 1 所示。

表 1　II 型接线和 H 型接线的优缺点对比

Table 1 The advantages and disadvantages of type II and type H connection

项　　目	II 型接线	H 型接线
完好元件的电压升高	较小	较高
电容配平要求	较高	较低
对 CT 的要求	大变比、低绝缘水平、低成本	小变比、高绝缘水平、高成本
保护整定原则	串段断路	串段断路

单元有采用内熔丝的，也有采用无内熔丝的。目前单元采用内熔丝是主要的，也有少数例外，如云广工程[7]和葛洲坝-上海南桥工程（以下简称葛南工程）的 HP12/36 支路等。葛南工程可以说是中国第一个常规直流输电工程，由原 BBC 公司承建[2]，BBC 公司后来与西屋公司合并成立现在的 ABB 公司。该工程属于早期的直流输电工程，采用无内熔丝保护与 II 型接线配合。

2、直流滤波电容器采用内熔丝保护的合理技术背景

由于葛南工程在技术上不成熟，直流滤波电容器故障较多[1]~[3]，很快进行了多次改造，所以这个工程以后的直流输电工程中，除云广工程外，单元都采用了内熔丝设计。葛南工程直流滤波电容器故障率高的根本原因，不是内熔丝的问题，但却可能是导致中国后来的直流输电工程内熔丝化的根本原因。当时的直流滤波电容器存在以下不足：

1）均压技术不够成熟。没有充分考虑直流电压受外部污秽电阻影响的因素，该工程最初的直流滤波电容器没有设置内均压电阻，导致早期损坏率很高，后来进行了第一次改造，在每台电容器两端外部增加了均压电阻[2]，但问题仍然没有解决，文献[11]对此已经做过分析。

第二次改造除了将均压电阻内置外，对 HP12/24 支路采用了内熔丝设计，这在一定程度上缓解了电容器的故障问题，所以当时认为这个改造是成功的，这可能就是直流滤波电容器内熔丝化的最初原因。如果把电容变化超过 1 个元件的电

容器都视为电容器故障的话，其实增加内熔丝的电容器故障率并没有降低。这应该是当时电容器单元技术水平所限，与增加内熔丝没有直接的关系。但增加内熔丝后，电容器单元的串联数增加了一倍，单元的额定电压下降了一半，均压电阻的发热问题得到很大的缓解，对于延长电容器的使用寿命还是很有意义的。

2）没有充分考虑污秽对直流电压分布的影响。最初一批直流滤波电容器的额定电压只取 540kV，没有考虑直流电压的分布不均匀系数，几乎没有考虑谐波电压。后来改造的一批直流滤波电容器的额定电压也只有 600kV，电压不均匀系数也只有 1.05 左右，与现在的 1.3 相去甚远。

3）直流滤波电容器单元的技术不够成熟。这主要表现在，一是设计场强过高[1]~[2]，在当时没有考虑电压不均匀系数的情况下，设计场强还达到 110kV/mm 左右，折算到现在的额定电压，这个场强将达到 150kV/mm 以上，显然太高了！这也是该工程直流滤波电容器故障率过高的重要原因之一；二是该工程的直流滤波电容器单元不太适合在直流电压下运行，还有许多深层次的原因，这也许也是受当时的技术水平所限。

综上所述，葛南工程直流滤波电容器改造采用内熔丝，在以下两个技术背景下是合理的：一是直流滤波电容器的额定电压的电压不均匀系数较小，有利于内熔丝设计，内熔丝性能相对可靠；二是电容器单元技术不够成熟，采用内熔丝设计可以延长电容器的故障检修周期，缓解直流滤波电容器的故障问题。

2、内熔丝直流滤波电容器与保护配合的问题分析

2.1 元件最小并数问题

关于交流电容器的内熔丝问题，国内的专家已经做了大量的研究[12]~[17]，但均没有涉及直流滤波电容器。文献[11]、[18]对直流滤波电容器的内熔丝做过分析，也没有涉及与保护的配合问题。根据文献[11]的分析，不均匀系数取得小对于电容器装设内熔丝是有利的，可以使电容器内每个串联段的最小元件并联数较小，内熔丝动作的可靠性高。这也是中国直流输电技术发展初期，直流滤波电容器装设内熔丝的合理之处与技术背景。由文献[11]可知，元件最小并联元件数与电压分布不均匀系数和谐波含量的关系如式（1）所示。

$$m \geq 1 + \frac{6.25}{0.98}(1.3+\alpha)^2 \qquad (1)$$

式中，m ——电容器内串联段的最小元件并联数；$\alpha = \sqrt{2}\sum_{h=1}^{50} U_h / U_{DC}$——电容器上的峰值谐波含量，其中 $\sum_{h=1}^{50} U_h$ 为电容器上的谐波含量总和；U_{DC} 为最大持续运行直流电压。对不同的谐波含量，按照式（1）计算得到的元件最小并联数如表 2 所示。

表 2　谐波含量与元件最小并联数的关系

Table 2 The relationship of minimum parallel element number and the harmonic content

α	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55
m（k=1.3）	15	16	17	18	19	20	21	22	23
m（k=1.05）	11	11	12	13	14	15	16	17	18

从表 2 可以看出，随着系统谐波含量的增加，元件的最小并联数增加，内熔丝的装设也会越来越困难。随着特高压直流输电技术的发展，送端和受端的网络情况更为复杂，直流侧系统的谐波含量也会越来越大，如哈郑工程，谐波峰值含量就达到 50%左右，宁浙工程还会更高，这样直流滤波电容器装设内熔丝将会越来越困难。此外，像青藏工程那样输送容量较小的直流联网工程，装设内熔丝也绝非易事。采用无熔丝设计，将会使直流滤波电容器的约束条件大大解放，总体设计将豁然开朗。因此，进行直流滤波电容器的无内熔丝技术研究将迫在眉睫。这就是笔者为什么提出直流滤波电容器采用无内熔丝设计的技术背景。

3、内熔丝直流滤波电容器在元件故障后的运行状况分析

从上述分析可知，由于直流滤波电容器的内熔丝在运行状态下熔断的根数有限，那么电容器在元件击穿后，会导致两种极端情况：一是短路，另一个是开路。此外，由于直流滤波电容器的等效容量很大，单台电容器在 50Hz 频率下，等效容量可能达到 2000kvar，所以每个串联段的储能也很高，对内熔丝断口的考验也极为苛刻。下文将作进一步分析。

3.1　串段短路情况分析

既然继电保护是以元件短路作为计算依据的，串联段短路应该就是直流电容器最常见的故障型式。元件串联段短路就是该串联段有元件击穿，内熔丝却没有动作的故障表现形式。该故障现象的直接后果就是，整台电容器的电流全部流经故障元件的内熔丝（以下简称故障熔丝），这势必使故障熔丝的温度异常升高，引起绝缘油老化，甚至引发相邻元件热击穿。假设整台电容器的额定电流是 100A，采用 20 并设计，熔丝在情况下只通过 5A 的电流。这个电流对于浸泡在绝缘油中的内熔丝来说，不会引起温升异常。但如果元件击穿，熔丝没有动作，100A 的电流全部流经故障熔丝，能量 400 倍，熔丝表面的温度将会远远超过绝缘油允许的 80℃！电容器运行安全将会受到很大影响。因此，可以说，在这种运行工况下，直流滤波电容器继续运行将会带来极大的隐患！换句话说，直流滤波电容器装设内熔丝也是一个极大的隐患，建议取消为好！在既成事实的情况下，一旦发现内熔丝电容器有串联段短路，必须无条件将其退出运行。

实际上，出现串段短路还有另外一个隐患，那就是容易造成套管断裂，进而导致严重的运行故障。串段短路后，由于只有故障熔丝流过电流，而且故障熔丝

的温升很高，在突然来一个电压冲击时，故障熔丝很容易就发生突然熔断，导致该串联段的其余熔丝突然受到一个冲击而导致群爆，这个冲击波很容易造成电容器的套管断裂，在进行电容器外壳耐爆破试验时就容易发生这种情况。这个隐患也不能忽视。因此，直流电容器取消内熔丝应该是一个必然选择。

3.2 开路

前面已经分析了内熔丝动作后果的一种极端情况，内熔丝动作的另一种极端情况是开路。开路可以在上述分析的短路后的极端情况下出现，也可以在内熔丝性能不良的情况下出现。内熔丝性能不良主要包括两个方面：一是由于内熔丝技术问题导致的，二是由于电容器内元件部分击穿后导致的。前者是内熔丝技术不过关，达不到标准的要求，或者说其分散性及性能的重复性达不到标准的要求。后者则是没有考虑部分元件击穿后对内熔丝性能的要求。其表现形式是，在某些情况下，内熔丝发生群爆，导致整个串联段的熔丝全部动作，电容器开路。电容器开路的直接后果是，交流分量没有了电容通路，直流滤波器没有了滤波效果，导致直流滤波器失谐，保护动作，可能会导致闭锁，直接危害到系统的正常运行。内熔丝的这个隐患对于直流滤波电容器也应引起高度重视！特别是目前国家标准[19]和招标技术规范都规定电容器单元的电压不均匀系数取 1.3 的情况下。不可否认，这个电压不均匀系数 1.3 虽然对内熔丝的性能不利，但却更符合电容器的运行工况，对于提高直流滤波电容器的安全运行是极其有利的，应该坚持。

3.3 断口电阻下降

关于内熔丝的试验，有很多文献[20]~[22]做过研究，但都没有涉及熔丝断口电阻下降的问题。因为这个指标对于交流电容器来说，的确不重要。但对于直流滤波电容器来说，却是一个值得重视的问题。由于复合绝缘的直流击穿电压较高，直流滤波电容器的设计场强也相对较高，差不多达到工频交流击穿电压的 2 倍左右，这样直流滤波电容器的设计场强也会达到交流电容器的 2 倍左右。电容器单位体积的储能就会达到交流电容器的 4 倍左右。按照文献[23]，对于全膜电容器这个比值，在 1.75~1.82 倍左右，即使是这样，直流滤波电容器的单位介质储能也达到交流电容器的 3 倍以上。这对内熔丝的熔断是有利的，但在能量较大且能量效率较高的情况下，对熔丝熔断后的断口的考核也极其严苛。在某些情况下，由于熔丝熔断过于厉害，熔丝依附的绝缘板表面的碳化会很严重，甚至会导致该表面的沿面电阻下降，可能会影响直流电压的分配，危害到直流电容器的安全运行。目前还没有人对这个问题提出质疑，但这个问题是客观存在的。这个问题对于直流滤波电容器应该引起高度重视。由于目前直流滤波电容器关于内熔丝的标准基本上是借用交流电容器的，没有考虑直流滤波电容器的特殊性，也就没有提出对直流滤波电容器内熔丝断口电阻的问题。

4、直流滤波电容器采用无内熔丝保护的合理性及运行状况展望

4.1 直流滤波电容器的保护整定原则分析

从前文的分析可以看出，在不均匀系数为 1.3 的情况下，内熔丝可靠动作需要的最小并联元件数较大，直流滤波电容器的保护整定如果按照交流电容器那样采用内熔丝熔断根数来进行，显然是不现实的，需要的元件并联数可能需要在 30 以上，这实现起来会非常困难，成本会很高。一方面是元件个数很多，生产效率很低；另一方面，为了保证元件工艺性，需要增加元件的厚度，需要降低设计场强，甚至可能会降到 80MV/m 左右，使电容器的成本大幅度提高。同时，由于元件厚度还是处于边缘水平，其焊接的可靠性依然难以保证，电容器的质量也很难保证。所以直流滤波电容器通常采用短路的元件串联段数作为保护整定计算依据。从这个意义上说，直流滤波电容器有无内熔丝都是一样的，最后都一样表现为串联段短路。也就是说，从与保护配合来看，直流滤波电容器完全可以取消内熔丝。

实际上，对于直流滤波电容器而言，由于直流电压按电阻分布，由于电容器内的均压电阻阻值不因元件击穿或内熔丝动作而变化，故障串联段上的电压变化很小，采用串联段短路作为保护整定依据是正确的。如果向交流电容器那样，采用熔丝熔断根数来作为保护整定计算的依据，那实质上的依据又是什么呢？交流内熔丝电容器，保护整定是以元件过电压倍数作为依据的。对于直流内熔丝滤波电容器，很难确定出一个合理的过电压倍数值作为保护整定的计算依据，因为标准[19]没有对直流滤波电容器的过载能力作出规定，而且前面已经说过，直流滤波电容器的元件过电压，不管是故障段还是非故障段，随元件个数的变化都很小。也就是说，直流滤波电容器以短路串联段作为保护整定依据更合理，这应该也是目前全世界都采用这个整定原则的根本原因之一。

4.2 直流滤波电容器采用无内熔丝保护的合理性

从上面的分析可知，尽管内熔丝直流滤波电容器在某些情况下，可以缓解电容器故障率过高的问题，但随着电容器技术的发展，直流滤波电容器的技术日臻成熟，故障率也将会大大降低，直流滤波电容器采用无内熔丝保护将更为合理。归结的理由主要有：

4.2.1 无内熔丝直流滤波电容器与 II 型和 H 型接线保护的配合与内熔丝电容器是一样的，没有任何问题，直流滤波电容器采用无内熔丝保护是可行的。实际上，由于交流电压分量的存在，内熔丝直流电容器的电压分布会受到部分内熔丝动作的影响，采用无内熔丝设计，这个问题将不复存在。因此，直流滤波电容器采用无内熔丝保护也更合理。

4.2.2 从内熔丝电容器在直流电压下的运行隐患来看，内熔丝直流滤波电容器出现短路、开路和断口电阻下降都会在很大程度上影响电容器的安全运行，应该考虑避免。

4.2.3　从目前内熔丝电容器单元的技术现状上看，能够真正掌握直流滤波电容器内熔丝技术的电容器厂家只是极少数，能满足下限 0.7 倍最高直流运行电压下，内熔丝可靠动作的电容器厂家更是绝无仅有。即使是这样，内熔丝电容器的隐患仍然不可避免。

4.3　直流滤波电容器采用无内熔丝保护的运行情况展望

随着直流滤波电容器技术的发展，直流滤波电容器的击穿损坏问题、绝缘老化问题将得到根本的解决，直流滤波电容器的故障率也将会得到有效地控制，这样电容器的早期损坏将不成为问题，内熔丝的作用也就消失殆尽了。同时，由于没有了内熔丝的制约，直流滤波电容器的设计在其他方面将会更加合理，更加符合生产的工艺条件，质量可靠性也会进一步提高，成本也会更低。对于直流滤波电容器而言，由于每个臂的单元都只有 1 并，满足外部先串后并的要求，总串数达到 200~400，击穿 1 串的电压升高只有 0.25%~0.5%，加上均压电阻的电压均匀作用，无熔丝直流滤波电容器工况比交流电容器要好得多。可以预言，只要采用了正确的技术，无内熔丝直流滤波电容器的运行状况就一定能比内熔丝直流滤波电容器更好，也更安全。不会出现内熔丝电容器的短路、开路及断口电阻下降带来的安全隐患。当然掌握直流电容器的关键技术是前提，但如果没有掌握直流滤波电容器的关键技术，内熔丝电容器也一样是不行的。

5、小结及建议

5.1　内熔丝直流滤波电容器在我国直流输电技术发展初期，直流电容器技术不太成熟的情况下提出的一个相对合理的解决办法，是一个历史选择，在当时的条件下确实起到了降低电容器运行故障的效果，值得肯定。

5.2　随着直流输电技术的发展，直流滤波电容器的技术也取得了长足的进步，这给直流滤波电容器采用无熔丝设计带来了契机。

5.3　1.3 的电压不均匀系数对直流滤波电容器的内熔丝设计起了很大的制约作用，不利于内熔丝电容器的安全运行。但 1.3 的电压不均匀系数对直流滤波电容器运行安全可靠性提供了保障，应该坚持。

5.4　内熔丝直流滤波电容器在运行过程中存在短路、开路和断口电阻下降等情况，都会直接威胁到直流滤波电容器的安全运行，应该考虑避免。

5.5　无内熔丝直流滤波电容器不会出现内熔丝电容器那样的短路、开路和断口电阻下降的问题，在直流滤波电容器技术日臻成熟之际，应该是一个更好的选择。同时，由于没有了内熔丝的制约，直流滤波电容器的设计在其他方面将会更加合理，更加符合生产的工艺条件，质量可靠性也会进一步提高，成本也会更低。可以预言，无内熔丝电容器的运行状况就一定能比内熔丝电容器更好，也更安全。

5.6　建议直流滤波电容器采用无内熔丝设计。

参考文献

[1] 卢有盟. 葛洲坝换流站 BD12/BD22 滤波器电容器损坏原因分析报告[J]. 电力电容器技术，1997 年第 2 期。

LU You-meng. The Analysis Report on Why the Filter Capacitors of BD12/BD22 in Gezhouba Converter Station Failure [J]. The Technical of Power Capacitors, 1997, 2.

[2] 陈峦. 换流站交直流滤波器高压电容器的选型及设计[J]. 华中电力，2001, 14(6): 36-38.

CHEN Luan. The Design and Type Selection for High Voltage Capacitor of AC and DC Filter in Converter Station [J]. Central China Electric Power, 2001, 14(6): 36-38.

[3] 郑斌毅，吴元熙. 交、直流滤波器中电力电容器的运行和改造[J]. 电力电容器，2006, 27(1): 30-34.

ZHENG Bin-yi, WU Yuan-xi. Operation and Improvement of Power Capacitor in AC/DC Filter [J]. Power Capacitors, 2006, 2006, 27(1): 30-34.

[4] 国家电网公司直流输电运行考察团. 直流输电运行考察报告[J]. 电力设备，2003, 4(3): 57-59.

China HVDC transmission operation review CRP.. “Study mission report on HVDC transmission operation”[J]. Electrical equipment, 2003, 4(3): 57-59.

[5] 曾喜闻，凌云. 直流换流站滤波电容器运行情况分析及改进措施[J]. 电力电容器与无功补偿，2012, 33(5): 74-77.

ZENG Xi-wen, LING Yun. Operation Analysis and Improvement Measures of Filter Capacitor in Converter Substation [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(5): 74-77.

[6] 郝江涛，黄葵。天生桥换流站直流滤波电容器近年来频繁损坏的原因分析及改造措施[J]. 高压电器，2010, 46(9): 94-98.

Hao Jiang-tao, Huang Kui. Damage analysis of the DC filter capacitors in TIANSHENGQIAO converter station with countermeasures [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 94-98.

[7] 左干清，叶建铸，石延辉，谢超。特高压换流站直流滤波电容器故障分析研究[J]。电力电容器与无功补偿，2013, 34(6): 88-94.

Zuo Gan-qing, Ye Jian-zhu, Shi Yan-hui, Xie Chao. Study on fault analysis of DC filter capacitor for UHV converter station [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation. 2013, 34(6): 88-94.

[8] 程江平，周全. 直流滤波器保护研究和改进[J]. 电力系统保护与控制，2011, 39(4): 105-109.

CHENG Jiang-ping, ZHOU Quan. Study and Improvement of DC Filter Protection [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 105-109.

[9] 姚其新，胡斌，饶洪林。 换流站直流滤波电容器不平衡保护动作原因分析及建议[J]. 湖北电力，2012, 36(2): 13-14.

YAO Qi-xin, HU Bin, RAO Hong-lin. Analysis of DC Filter Capacitor Unbalance Protection Malfunction and Proposal in Converter Station [J]. Hubei Electric Power, 2012, 36(2): 13-14.

[10] 陆岩. 高肇直流系统直流滤波器 C1 电容器过负荷保护误动原因分析及改进措施[J]. 广东电力，2008, 21(9): 56-59.

LU Yan. Analysis and Improving measures for Overload Protection Misoperation of DC Filter Capacitor C1 in Gaozhao HVDC System [J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(9): 56-59.

[11] 黄葵，左强林. 特高压直流输电用直流滤波电容器的若干问题研究[C]//2006 特高压输电技术国际会议论文集，2006.

[12] 倪学锋，姜胜宝，林浩，等. 内熔丝电容器保护配合元件过电压倍数选择的原则和依据[J]. 电力电容器与无功补偿，2008, 29(3): 1-3.

NI Xue-feng, JIANG Sheng-bao, LIN Hao, etc.. Selection Principle and Basis of Overvoltage

Multiple of the Protection Matching Element of Capacitor with Internal Fuse [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(3):1-3.
[13] 盛国钊，倪学锋，严飞. 单台电容器内部故障保护的合理选择[J]. 电力设备，2008, 29(11): 61-63.
SHENG Guo-zhao, NI Xue-feng, YAN Fei. Reasonable Selection of Internal Fault Protection for Single Capacitor. Electric Equipment, 2008, 29(11): 61-63.
[14] 周登洪，马变珍. 高压电力电容器用内熔丝 [J]. 电力电容器与无功补偿，2009, 30(1): 16-17.
ZHOU Deng-hong, MA Bian-zhen. Internal Fuse for High Voltage Capacitor. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(1): 16-17.
[15] 胡炜，姚成. 高压内熔丝电容器探讨[J]. 电力电容器与无功补偿，2011, 32(5): 37-39.
HU Wei, YAO Cheng. Discussion on High Voltage Internal Fuse Capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(5): 37-39.
[16] 谢明华，王洪朋，张祝平，等. 电力电容器用内熔丝有关试验问题探讨[J]. 电力电容器与无功补偿，2013, 34(4): 40-45.
XIE Ming-hua, WANG Hong-peng, ZHANG Zhu-ping, et al. Discussion on Testing of Internal Fuses Used in Power Capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(4): 40-45.
[17] 倪学锋，刘瑞云，林浩，等. 关于无熔丝电容器和内熔丝电容器优劣的一点看法[J]. 电力电容器与无功补偿，2012, 33(5): 28-32.
NI Xue-feng, LIU Rui-yun, LIN Hao, etc.. Opinion About Merits Demerits of Internally Fused Capacitor and Fuseless Capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(5): 28-32.
[18] 左强林，马维勇. 特高压直流滤波电容器组的设计问题研究[C]//2009 特高压输电技术国际会议论文集，2009.
[19] GB/T 20993-2012. 高压直流输电系统用直流滤波电容器及中性母线冲击电容器[S].
GB/T 20993-2012. DC filter capacitors and neutral bus capacitors for HVDC transmission systems [S].
[20] 刘兵，王鸿鹏，谷劲松. 直流输电工程用电容器内熔丝的试验验证. 电力电容器与无功补偿，2008, 29(1): 37-40.
LIU Bing, WANG Hong-peng, GU Jin-song. Test Verification of Capacitor Internal Fuse Used in HVDC Transmission Project. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(1): 37-40.
[21] 郭天兴，吴俊丽，刘策. 高压电容器内部熔丝试验方法研究[C]//2009 电力电容器 无功补偿技术论文集，2009, 6-11.
[22] 房金兰. 内部熔丝隔离试验方法探讨. 电力电容器，2006, 27(1): 23-26.
FANG Jin-lan. Discussion on the Method of the Disconnecting Test on Internal Fuses. Power Capacitors, 2006, 27(1): 23-26.
[23] 李兆林，陈松，冯春林. 电容器介质直流、交流击穿电压值的对比研究[J]。电力电容器与无功补偿，2011, 32(2): 38-42。
LI Zhao-lin, CHEN Song, FENG Chun-lin. Comparison Study on AC and DC Breakdown Voltage Ratio of Power Capacitor Dielectric [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation. 2011, 32(2): 38-42.