

移相电容器的保护装置

陕西省渭南地区电业局 张付长

随着电力系统的逐步扩大,农村用电的日益增长,对电压质量和功率因数的改善提出了更高的要求。实践证明:在供电网路中装置移相电容组对改善功率因数及提高运行的经济性;保证电压质量;降低线损起着极为重要的作用。但是,由于目前电容器质量上尚存在着的一定的缺陷,运行中由于内部元件击穿等原因引起的事故较多,加之保护不妥,往往事故扩大。因此,对移相电容组采用装设可靠的保护装置已引起运行单位的重视。本文从理论上和实际运行经验方面就电容组的保护装置加以讨论,以供参考。

一、保护装置装设的一般原则

电容器组的保护包括外部和内部保护装置两方面。

外部保护作为电容器组电缆引线至终端盒,引接母线及电容器内部故障扩大引起的相间短路保护。

内部保护作为每台电容器内部故障的保护,在电容器内部串联元件逐级击穿时,由于电容器容抗的减小,故障电流增大,保护装置迅速可靠的将其从电源上切除。

二、电容器组的熔断器保护

用高压熔断器代替油开关作为电容器组的外部保护具有简单经济的优点。其接线如图1所示。但是由于目前生产的RN₁型熔断器遮断容量较小(仅200兆伏安),因此不宜在大电流系统中广泛采用,一般只用于保护300千乏以下及装于系统遮断容量较小的农村变电站的电容器组。

高压熔断器额定电流的选择,应避免电容器组投入运行瞬间的冲击电流,由于各国生产的熔断器特性不一,故在选择上各有差异。

比利时ACEC工厂推荐保护电容器的熔丝的选择如表1所示:

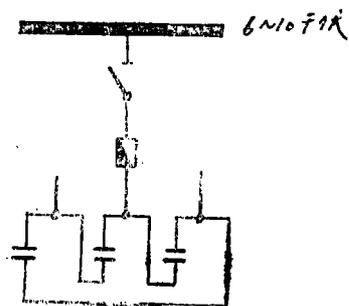


图 1

表1 ACEC厂推荐的电容器熔丝的选择

电容器组的额定电流(安)	熔丝的额定电流倍数
2以下	5
2~10	2.5
10~25	2
25以上	1.6

日本6.6千伏保护电容器的熔丝额定电流 I_{BH} 的选择,按下式进行:

$$I_{BH} = (2.8 \sim 3.8) I_{CH} \quad (1)$$

式中: I_{CH} ——电容器组的额定电流。

西安电力电容器厂和有关设计单位建议采用:

$$I_{BH} = (1.5 \sim 2.5) I_{CH} \quad (2)$$

根据式(2)算出保护电容器组的额定电流(熔断器)如表2所示:

表2 保护电容器用的熔断器的选择

电容器组容量 (千乏)	50		100		200		300	
电容器组额定电压(千伏)	6.3	10.5	6.3	10.5	6.3	10.5	6.3	10.5
电容器组额定电流(安)	4.8	2.9	9.6	5.8	19.2	11.6	28.8	17.4
熔断器额定电流(安)	10	7.5	20	10	30	20	50	40

运行情况表明,以上数据是切实可行的。

用熔断器来进行电容器的内部故障保护是一种常用的措施。我国生产的YY型低压电容器和CY型串联电容器的内部每个并联元件都附装有熔丝,在单个元件故障的情况下,熔丝熔断,将故障元件断开,电容器组仍可照常运行。某些国外生产的高压电容器每台亦装有熔丝成套供应。运行情况表明:这种熔丝能够和电容器的特性相配合,效果是良好的。目前我国生产的YY型高压电容器不附装相配合的熔丝。因此,须另行选择熔断器来进行保护。电容器组的熔断器保护接线有单台保护和分组保护两种形式(图2)。

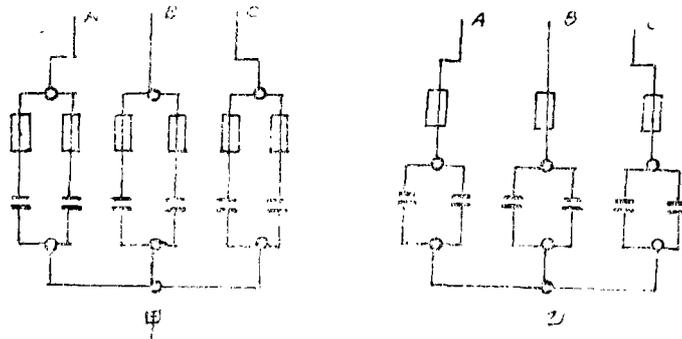


图 2

三、过电流保护装置

过电流保护是用来作为电容器组的外部保护，结线见图 3 所示。

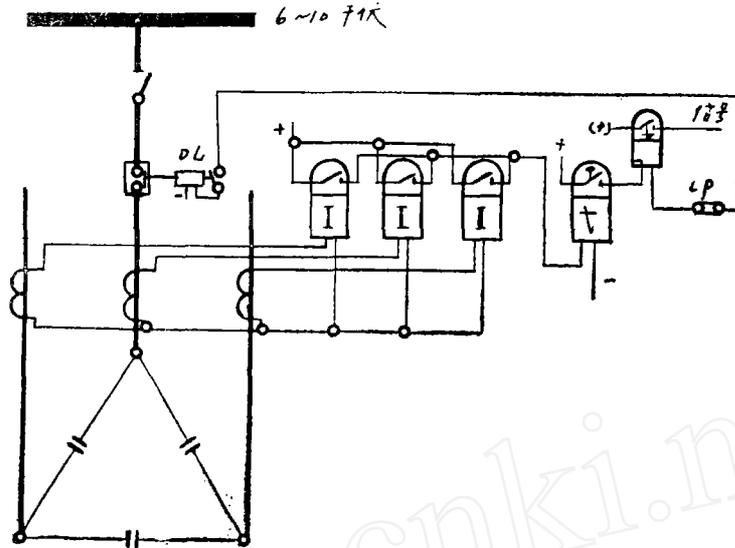


图 3

为了使正常运行情况下，不致使保护装置发生误动作，动作电流按下式计算：

$$I_{cp} = \frac{K_H}{\pi_T} \cdot I_H \cdot K_{cx} \quad (3)$$

式中： K_H ——可靠系数，一般取1.5~2.0；

I_H ——电容器组的额定电流（电流·安）安；

π_T ——电流互感器的变比；

K_{cx} ——结线系数，当电流互感器接成星形时 $K_{cx} = 1$ ，结成三角形接线时 $K_{cx} = \sqrt{3}$ 。

验算结果表明：过电流保护作为电容器组内部元件故障的保护时，其灵敏度是低的甚至不起作用。

四、另序保护装置

零序保护装置的原理结线如图 4 所示。利用分别装设在三相上的电流互感器构成零序回路以保护电容器的内部故障。在正常情况下，由于三相电流相等，其相位差为 120° ，另序回路中的电流等于零。当其中一台电容器内部一部分元件损坏发生击穿短路时，故障相电流发生显著的变化，则保护装置动作。设每相电容器组由 N 台电容器并联组成。每台电容器内部有 n 个串联元件组成，其电容为 C_n ，则容量为 $Q_n = \omega \cdot C_n \cdot U^2$ （图 5）。每个元件的电容为 $C_0 = n \cdot C_n$ ，容量为 Q_0 ，如果有 m 个元件击穿（短路）

时, 剩下 $n-m$ 个元件是好的, 则 $n-m$ 元件的容量 $Q_{n-m} = \omega \frac{n \cdot C_n}{n-m} U^2 = Q_n \frac{n}{n-m}$ 。
通过 $n-m$ 个元件的电流:

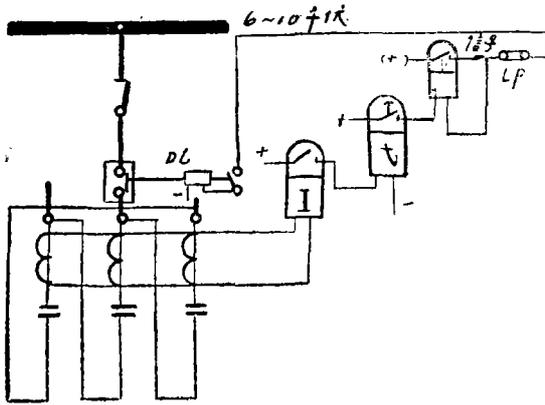


图 4

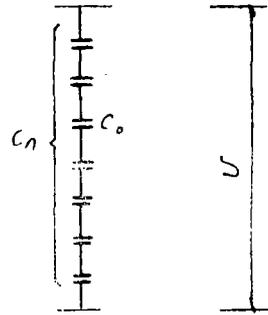


图 5

$$I_{n-m} = \frac{Q_{n-m}}{U} = I_{CH} \frac{n}{n-m} \quad (4)$$

式中: I_{CH} ——每台电容器的额定电流。

故障相的电流增量为:

$$\Delta I_K = \left[(N-1) I_{CH} + \frac{n}{n-m} I_{CH} \right] - N I_{CH} \quad (5)$$

令: $\frac{m}{n} = \lambda$ 为击穿系数。

$$\text{则: } \Delta I_K = I_{CH} \left(\frac{\lambda}{1-\lambda} \right) \quad (6)$$

显然, 这个电流增量 ΔI_K 将反应到零序回路中, 通过保护装置。

式(6)表明 ΔI_K 的数值只与单台电容器的额定电流及击穿系数有关, 与整个电容器组的台数和总容量无关。图6示出一台电容器内部击穿时 ΔI_K 和击穿元件数 m 的关系曲线。

为了使保护装置有足够的灵敏度, 继电器的动作电流可按式(7)整定:

$$I_{CP} = \frac{\Delta I_K}{K_u \cdot n_T} = \frac{I_{CH} \left(\frac{\lambda}{1-\lambda} \right)}{K_u \cdot n_T} \quad (7)$$

式中: K_u ——灵敏系数, 可取1.5;

ΔI_K ——可取 $\lambda = 50 \sim 70\%$ 时的数值。

事实上在正常运行情况下不平衡电流是存在的, 为了使保护装置不致误动作起见, 要求通过调正使一次不平衡电流(I_M)不超过下述数值:

$$I_M \leq \frac{I_{CP} \cdot n_T}{K_H} \quad (8)$$

下面介绍一个正定的实例。设某变电站装设YY-6.3-10-1移相电容器60台,

每相20台，△连接，电容器组运行电压6.3千伏。电容器组每相的额定电流为：

$$I_{H\phi} = N \cdot I_{CH} = 20 \frac{10}{6.3} = 32 \text{安}$$

按额定电流选择电流互感器的变比应为30/5。一台电容量50%元件击穿时，故障相电流的增量 ΔI_K 为：

$$\Delta I_K = I_{CH} \left(\frac{\lambda}{1-\lambda} \right) = 1.6 \text{安}$$

继电器的动作电流应满足：

$$I_{CP} = \frac{1.6}{1.5 \cdot 30/5} = 0.178 \text{安}$$

因此，继电器的动作电流可取0.15安。为了防止由于不平衡电流引起的误动作，要求正常运行时一次侧最大不平衡电流不应超过：

$$I_M \leq \frac{0.15}{2} \times 30/5 = 0.45 \text{安}$$

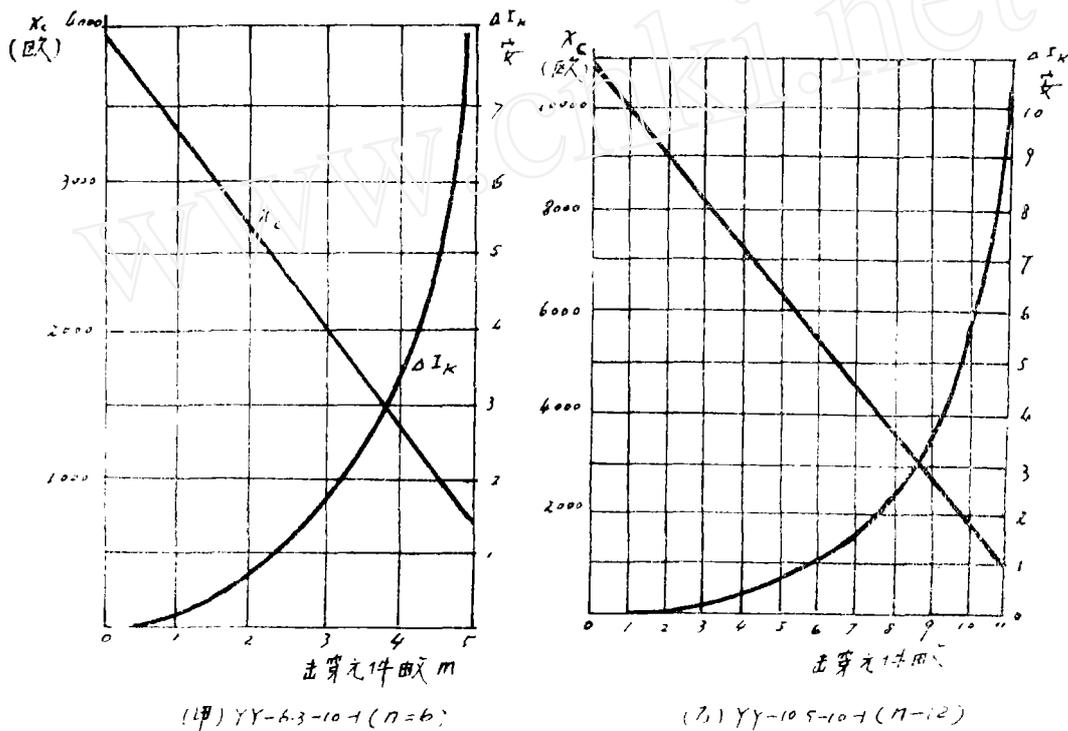


图 6

从上例可知，零序保护作为单台电容器内部故障的保护，效果比过电流保护好的多。但当电容器的单台容量愈小，部分串联元件击穿时产生的 ΔI_K 也愈小，整定愈困难。同理，整组电容器容量愈大，正常运行时受电压不平衡影响所产生的电流 I_M 也愈大，也给整定带来困难。为此，采用零序保护的电容器组容量一般不宜超过1000千乏。

为了使保护装置满足灵敏度和可靠性的要求，选用的电流互感器的额定电流应尽量与实际运行电流相接近，并应采用另序保护的专用电流互感器，以减少误差。电容器在安装过程中，各相间电容量要严格调整做到平衡，以减小不平衡电流。

五、横联差动保护

当电容器组按双△接线时，电容器组的内部故障保护采用横联差动保护比零序保护的效果更为理想。其原理接线见图7所示。

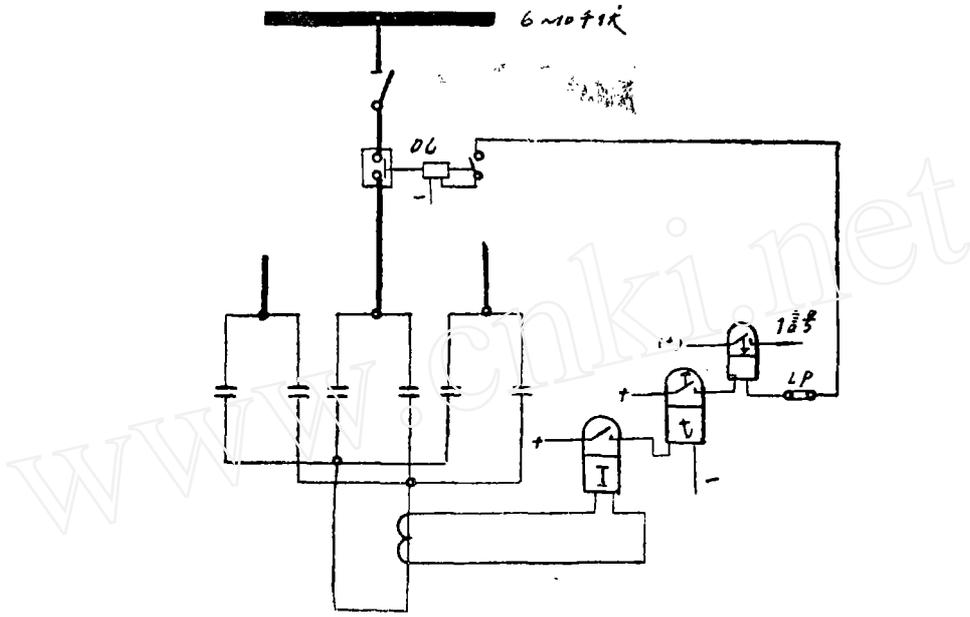


图 7

在正常运行情况下，如果不考虑不平衡电流的影响，通过两臂中的电流数值相等，相位相同，于是差电流为零，故保护装置不会启动。当电容器组某相一臂中单台电容器的 n 个元件中有 m 个击穿时，通过横联差臂中的电流：

$$I_P = I_{CK} - I_{CH} = I_{CH} \left(\frac{\lambda}{1 - \lambda} \right) \quad (9)$$

式中： I_{CK} ——单台电容器 m 个元件击穿时的故障电流。
保护装置的动作电流按下式计算：

$$I_{CP} = \frac{I_P}{K_u \pi_T} = \frac{I_{CH} \left(\frac{\lambda}{1 - \lambda} \right)}{K_u \pi_T} \quad (10)$$

式中： K_u ——灵敏系数，可取1.8。

I_P ——取入=50~70%时的差电流值。

为了防止误动作， I_{CP} 还必须躲开正常运行时电流互感器二次侧差回路中的最大不

平衡电流值即：

$$I_{cp} \geq K_H \cdot I_M$$

式中： K_H ——一般取 2

I_M ——正常运行时二次侧差回路中的最大差电流。

六、中性线电流平衡保护装置

中性线电流平衡保护装置适用于电容器组接双星形结线联接时作为该电容器组内部故障的主要保护。原理接线图见图 8 所示。

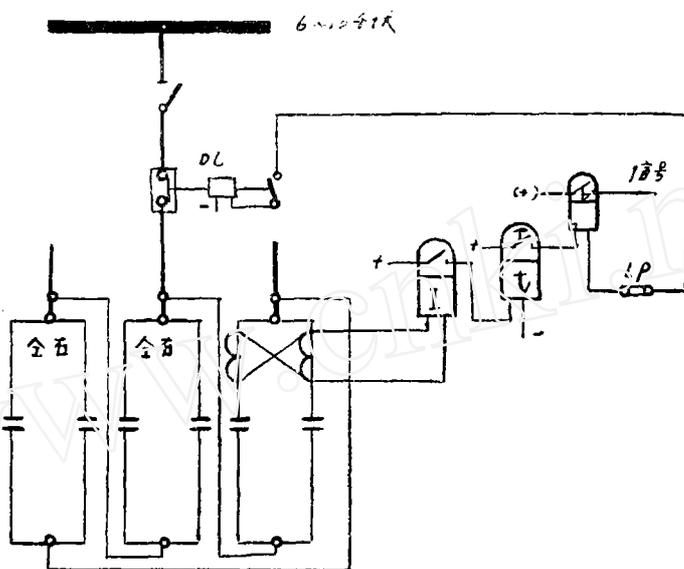


图 8

1. 在正常运行情况下，如果两星形各臂中的电容量调正的完全相同（不考虑不平衡度），则通过中性线的电流为零。

2. 故障情况下中性线电流的分析：

设星形每一臂由 N 台电容器组成，当 A 相第一组一台电容器 m 个元件击穿时，根据等效电路图 9 可求出通过中性线的电流值 $I_{0\alpha_2}$ 。

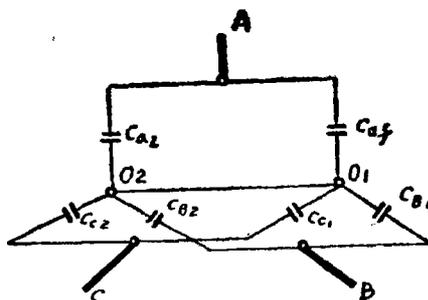


图 9

$$I_{0\alpha} = (\dot{U}_{O_1} - \dot{U}_{O_2}) Y_{\varepsilon} \quad (11)$$

式中: $\dot{U}_{O_1} \cdot \dot{U}_{O_2}$ —第一、二组中性点的电压;

Y_{ε} ——由两星形电容器中性点01、02间电源侧看到的导纳(1/欧)。

$$\dot{U}_{O_1} = \frac{\dot{U}_A C_{af} + \dot{U}_B C_{B1} + \dot{U}_C C_{C1}}{C_{af} + C_{B1} + C_{C1}} \quad (12)$$

$$\dot{U}_{O_2} = \frac{\dot{U}_A C_{a2} + \dot{U}_B C_{B2} + \dot{U}_C C_{C2}}{C_{a2} + C_{B2} + C_{C2}} \quad (13)$$

式中: $\dot{U}_A \cdot \dot{U}_B \cdot \dot{U}_C$ ——母线的相电压;

$C_{B1} \cdot C_{C1} \cdot C_{a2} \cdot C_{B2} \cdot C_{C2}$ ——第一、二组各臂的电容量。

将式12、13代入式11中则:

$$I_{0\alpha} = \left[\left(\frac{\dot{U}_A C_{af} + \dot{U}_B C_{B1} + \dot{U}_C C_{C1}}{C_{af} + C_{B1} + C_{C1}} \right) - \left(\frac{\dot{U}_A C_{a2} + \dot{U}_B C_{B2} + \dot{U}_C C_{C2}}{C_{a2} + C_{B2} + C_{C2}} \right) \right] Y_{\varepsilon}$$

$$\because C_{a2} = C_{B2} = C_{C2} = Y_{\phi}$$

$$\therefore \frac{\dot{U}_A C_{a2} + \dot{U}_B C_{B2} + \dot{U}_C C_{C2}}{C_{a2} + C_{B2} + C_{C2}} = \frac{Y_{\phi} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)}{3 Y_{\phi}} = 0$$

$$\text{故 } I_{0\alpha} = \frac{\dot{U}_A C_{af} + \dot{U}_B C_{B1} + \dot{U}_C C_{C1}}{C_{af} + C_{B1} + C_{C1}} Y_{\varepsilon} \quad (14)$$

其中:

$$\dot{U}_B = \dot{U}_A a^2$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_A a$$

a^2 ——矢量转子 = e^{j120°

$$C_{B1} = C_{C1} = N C_n$$

$$C_{af} = (N-1) C_n + C_{nf}$$

C_{nf} ——故障相单台电容器的电容量;

$$\because C_o = \Pi \cdot C_n$$

$$\therefore C_{nf} = \frac{C_o}{n-m} = \frac{n \cdot C_n}{n-m} = C_n \frac{1}{1-\lambda}$$

$$\text{故 } C_{af} = (N-1) C_n + C_n \frac{1}{1-\lambda}$$

$$Y_{\varepsilon} = W \cdot C_{f\varepsilon}$$

$C_{f\varepsilon}$ ——故障情况下两星形电容器组中性点01、02间电源侧看到的电容(法)。

$$C_{f\varepsilon} = \frac{C\lambda_1 C\lambda_2}{C\lambda_1 + C\lambda_2} \quad (15)$$

$C\lambda_1 \cdot C\lambda_2$ ——第一、二组电容器的电容量。

$$C\lambda_1 = 3 N C_n \quad (16)$$

$$C\lambda_2 = 2NCn + (N-1)Cn + Cn \frac{1}{1-\lambda} \quad (17)$$

将式16·17代入15式则

$$\begin{aligned} C_{ie} &= \frac{3NCn \times \left[2NCn + (N-1)Cn + Cn \frac{1}{1-\lambda} \right]}{3NCn + 2NCn + (N-1)Cn + Cn \left(\frac{1}{1-\lambda} \right)} \\ &= \frac{3NCn \left[(3N-1) + \left(\frac{1}{1-\lambda} \right) \right]}{(6N-1) + \left(\frac{1}{1-\lambda} \right)} \quad (18) \end{aligned}$$

将18式代入14式则:

$$\begin{aligned} I_{o\alpha} &= \frac{\dot{U}_A \left[(N-1)Cn + \left(\frac{1}{1-\lambda} \right) Cn + a^2 NCn + a NCn \right]}{2NCn + (N-1)Cn + \left(\frac{1}{1-\lambda} \right) Cn} \times \\ &\quad W \frac{3NCn \left[(3N-1) + \left(\frac{1}{1-\lambda} \right) \right]}{(6N-1) + \left(\frac{1}{1-\lambda} \right)} \\ &= \frac{\dot{U}_A Cn \left[\left(\frac{1}{1-\lambda} - 1 \right) + N(1+a+a^2) \right]}{Cn \left[(3N-1) + \frac{1}{1-\lambda} \right]} \times \frac{W 3NCn \left[(3N-1) + \frac{1}{1-\lambda} \right]}{(6N-1) + \frac{1}{1-\lambda}} \\ &= 3NW Cn \dot{U}_A \lambda \frac{1}{(6N-1)(1-\lambda) + 1} \end{aligned}$$

一般情况下 $6N \gg 1$, 故上式可简化为:

$$I_{o\alpha} = 0.5 \dot{U}_A W \cdot Cn \frac{\lambda}{1-\lambda} \quad (19)$$

3 保护装置的动作电流按下式计算:

$$I_{cp} \geq K_H \frac{I_{oT}}{\Pi_T} \quad (20)$$

式中: K_H —取1.5

I_{oT} ——正常情况下通过中性线的不平衡电流(安)。

为保证保护装置在一台电容器有70~80%元件击穿情况下能可靠的动作, 动作电流应满足:

$$I_{cp} \leq \frac{I_{of} - I_{oT}}{K_u \cdot \Pi_T} \quad (21)$$

式中: I_{of} ——当一台电容器元件在70~80%击穿时通过中性线的故障电流,

k_u ——灵敏系数, 取1.5。

由(21)式得:

$$I_{oT} \leq I_{of} - 1.5 \Pi_T I_{cp} \quad (22)$$

将式(20)代入(22)式后得:

$$I_{0r} \leq \frac{I_{of}}{3.25} = \frac{1}{3} I_{of} \quad (23)$$

由(23)式可知:要同时满足保护的可靠性和灵敏度的要求,则要求在正常运行情况下中性线的不平衡电流应小于或等于当一台电容器在70~80%串联元件击穿时通过中性线不平衡电流的1/3。

七、几点结论

1.熔断器和过电流保护对电容器内部故障的灵敏度是很低的,因此在电容器组中应装设内部保护装置。

2.目前生产的RN₁高压熔断器的性能不能满足移相电容器保护选择性的要求,因此,考虑生产与电容器特性相配合熔断器是必要的。

3.本文推荐的几种移相电容器内部保护装置的原理接线方案,在运行中效果较为满意,可根据实际情况加以采用。