

# 中压配电变压器低压侧单相接地保护浅析

杨旭东 (中国石油集团工程设计有限责任公司北京分公司, 北京市 100085)



## Preliminary Discussion on Low-voltage Side Single-phase Earthing Protection of Medium-voltage Distribution Transformer

Yang Xudong (Beijing Branch of China Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract** According to the understanding of *Design Code for Relaying Protection and Automatic Device of Electric Power Installation* and design practice, through calculation and analysis of the low-voltage side single-phase earthing protection of the 6~10 kV distribution transformer, it is suggested that, when D, yn11 transformer utilizes high-voltage side over-current protection concurrently as low-voltage side single-phase earthing protection, the sensitivity coefficient can normally meets the requirement; but when Y, yn0 transformer utilizes high-voltage side over-current protection concurrently as low-voltage side single-phase earthing protection and the sensitivity coefficient cannot meet the requirement, zero sequence current protection on the neutral line of low-voltage side shall be adopted as the single-phase earthing protection.

**Key words** Single-phase earthing protection  
Minimum sensitivity coefficient  
Over-load coefficient  
Maximum comprehensive coefficient  
Circuit breaker for total outgoing line

**摘要** 根据对《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》的理解和设计实践,通过对6~10 kV 配电变压器低压侧单相接地保护的分析和计算,提出: D, yn11 变压器利用高压侧过电流保护兼作低压侧单相接地保护时,灵敏系数一般均能满足要求;而对于 Y, yn0 变压器,当利用高压侧过电流保护兼作低压侧单相接地保护灵敏系数不满足要求时,应采用在低压侧中性线上的零序电流保护作单相接地保护。

**关键词** 单相接地保护 最小灵敏系数 过负荷系数 最大综合系数 总出线断路器

## 1 前言

目前,在6~10 kV 电压等级中,绕组采用 D, yn11

和采用 Y, yn0 连接方式的配电变压器最为常见。众所周知,由于配电变压器绕组采用 D, yn11 连接较之采用 Y, yn0 连接具有明显优点,抑制了3次谐波,降低了零序阻抗,更有利于低压侧提高断路器的单相短路电流动作的灵敏度,使之在近几年的工程设计中被广泛选用。根据经验,利用高压侧过电流保护兼作低压侧单相接地保护,对绕组为 D, yn11 连接的变压器(以下简称为 D, yn11 变压器),其灵敏系数均能满足要求;而绕组为 Y, yn0 连接的变压器(以下简称为 Y, yn0 变压器),其灵敏系数既有满足要求的,也有不满足要求的。现行国家标准《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》(GB 50062-92)中第4.0.11条和4.0.12条分别对 Y, yn0 和 D, yn11 变压器作出了不同的规定。笔者将通过计算来分析这一问题,并对 Y, yn0 变压器单相接地保护作简要论述。

## 2 用高压侧过电流保护兼作低压侧单相接地保护

### 2.1 过电流保护最大整定电流的计算

保护装置的整定电流:

$$I_{dzj} = K_k \times K_{jx} \times \frac{K_{gh} \times I_{1rt}}{K_h \times n_L} \quad (1)$$

式中:  $K_k$  —— 可靠系数,对 DL 型继电器取 1.2,

对 GL 型继电器取 1.3;

$K_{jx}$  —— 接线系数,接于相电流时取 1,接于

相电流差时取  $\sqrt{3}$ , 这里取 1;

$K_{gh}$  —— 变压器的过负荷系数;

$I_{1rt}$  —— 变压器一次侧的额定电流, A;

$K_h$  —— 继电器返回系数,取 0.85;

$n_L$  —— 电流互感器变比。

保护装置的一次动作电流：

$$\begin{aligned} I_{dz} &= \text{INT}(I_{dzj} + 1) \times n_L / K_{jx} \\ &\leq I_{dzj} \times n_L / K_{jx} + n_L / K_{jx} \\ &\leq K_k \times K_{gh} \times I_{1rt} / K_h + n_L / K_{jx} \end{aligned} \quad (2)$$

这里， $\text{INT}(x)$  函数表示对  $x$  取整。

所以，保护装置的一次动作电流的最大值公式为：

$$\begin{aligned} I_{dz \cdot \max} &= K_k \times K_{gh} \times I_{1rt} / K_h + n_L \\ &= K_c \times I_{1rt} + n_L \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $K_c$  —— 最大综合系数， $K_c = K_k \times K_{gh} / K_h$ 。

用计算方法确定  $K_{gh}$  时，应考虑变压器最严重情况下的过负荷。具体情况如下：

a. 单独运行的变压器，当电网无自动装置时：

$$K_{gh} = \frac{I_{q \cdot \max} + \sum I_{rh}}{I_{2rt}} \quad (4)$$

式中： $I_{q \cdot \max}$  —— 最大电动机的启动电流，A；

$\sum I_{rh}$  ——  $I_{q \cdot \max}$  以外其它负荷额定电流的总和，A；

$I_{2rt}$  —— 变压器二次侧的额定电流，A。

根据运行经验<sup>[2]</sup>， $K_{gh}$  取 3~4，此时，可不考虑  $K_k$  和  $K_h$  的影响。

b. 单独运行的变压器，当电网有自动重合闸时：

$$K_{gh} = \frac{1}{u\% + 0.2 \left( \frac{S_t}{\sum S_{zq}} \right) \times \left( \frac{1}{1.05} \right)^2} \quad (5)$$

式中： $u\%$  —— 变压器的阻抗电压，取值为 4%~4.5%；

$S_t$  —— 变压器额定容量，kV·A；

$\sum S_{zq}$  —— 自启动的全部电动机的总容量，kV·A。

c. 单独运行的变压器，当二次侧母线分段（母联）断路器有备用电源自投装置时：

$$K_{gh} = I_{fh \cdot \max} / I_{2rt} + K'_{gh} \quad (6)$$

式中： $I_{fh \cdot \max}$  —— 本段母线的最大负荷电流，A；

$K'_{gh}$  —— 可按式 (5) 进行计算。

在以上 b 和 c 两种情况下，一般取  $K_{gh}$  值为

1.5 ~ 2.5<sup>[2]</sup>。

d. 并列运行的变压器，应考虑另一台变压器检修或并列工作制被破坏后的过负荷。

这种情况属于变压器事故过负荷，一般应由过负荷保护动作于跳闸或断开部分负荷。因此，过负荷系数  $K_{gh}$  不会太大，但由于目前没有经验数据，这里取 3。综上所述，各种系数取值见表 1。

表 1 不同情况下各系数取值  
Tab. 1 Values for coefficients in different conditions

	$K_h$	$K_k$	$K_{gh}$	$K_c$
第 a 种情况	1	1	3~4	4
第 b 种情况	0.85	1.2 或 1.3	1.5~2.5	3.8
第 c 种情况				
第 d 种情况	0.85	1.2 或 1.3	3	4.6

可见最大综合系数  $K_c$  的值为 4.6，代入 (3) 式中得保护装置一次动作电流最大值公式：

$$I_{dz \cdot \max} = 4.6 I_{1rt} + n_L \quad (7)$$

## 2.2 低压侧单相接地保护最小灵敏系数的计算

保护装置的灵敏系数：

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{I_{2k1 \cdot \min}}{I_{dz}} \\ &= \frac{\frac{2}{3} I_{22k1 \cdot \min} / n_T}{I_{dz}} \\ &= \frac{2 I_{22k1 \cdot \min}}{3 I_{dz} \times n_T} \end{aligned} \quad (8)$$

式中： $I_{2k1 \cdot \min}$  —— 最小运行方式下，变压器低压侧母线或母干线末端单相接地短路时，流过高压侧（保护安装处）的稳态电流，A；

$I_{22k1 \cdot \min}$  —— 最小运行方式下，变压器低压侧母线或母干线末端单相接地稳态短路电流，A；

$n_T$  —— 变压器变比。

把 (7) 式代入 (8) 式中得：

$$K_{m \cdot \min} = \frac{2 I_{22k1 \cdot \min}}{3 I_{dz \cdot \max} \times n_T}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2I_{22k1 \cdot \min}}{3(4.6I_{rl} + n_L) \times n_T} \\
 &= \frac{2I_{22k1 \cdot \min}}{3 \left( \frac{4.6S_L}{\sqrt{3}U_1} + n_L \right) \times n_T} \quad (9)
 \end{aligned}$$

式中:  $U_1$  —— 变压器的一次额定电压, kV。

当  $n_T = 6/0.4$  kV 时, 代入 (9) 式得:

$$K_{m \cdot \min} = \frac{2I_{22k1 \cdot \min}}{19.92S_L + 45n_L} \quad (10)$$

当  $n_T = 10/0.4$  kV 时, 代入 (9) 式得:

$$K_{m \cdot \min} = \frac{2I_{22k1 \cdot \min}}{19.92S_L + 75n_L} \quad (11)$$

现以  $S_9$  变压器为例, 用式 (10) 和 (11) 进行计算, 对于 D, yn11 变压器而言, 计算方法与 Y, yn0 变压器相同, 只是公式的取值不同, 这里不再赘述。其中  $I_{22k1 \cdot \min}$  取《工业与民用配电设计手册》第三

版表 4-28、4-29 中的 400~1600 kV·A 变压器的单相短路电流值<sup>[1]</sup>, 计算结果见表 2 (表中只按 D, yn11 和 Y, yn0 变压器给出了一组灵敏系数值)。从表中可以看出: 只有 1000 kV·A、1250 kV·A 和 1600 kV·A 这三个容量等级的变压器在表中所给出的最小短路容量时灵敏系数略低于 1.5。这种特殊情况通常是变压器远离高压配电装置, 且过负荷系数很大时才会出现。实际上, 这种情况是很少见的。即使出现了这种情况, 为了节省电缆而省去低压侧的零序电流保护, 对低压侧单相接地短路保护的灵敏系数可以适当降低<sup>[3]</sup>, 但不低于 1.25。所以, 笔者认为, 利用高压侧过电流保护兼作低压侧单相接地保护, D, yn11 变压器的灵敏系数均能满足要求。

虽然表 2 是对  $S_9$  变压器的计算结果, 但由于 D, yn11 变压器的零序阻抗均近似等于正序阻抗, 因此, 这一计算结果具有普遍意义。同时, 我们也可以看出, 高压侧短路容量的大小对 Y, yn0 变压器的灵

表 2 用高压侧过电流保护兼作低压侧单相接地保护的最小灵敏系数  
Tab. 2 The minimum sensitivity coefficient for over-current protection on high-voltage side concurrently as single-phase earthing protection on low-voltage side

变压器容量 (kV·A)		400		500		630		800		1000		1250		1600	
变压器阻抗电压 (%)		4						4.5							
低压母线 (LMY, mm)		3 × (63 × 6.3) + 40 × 4		3 × (80 × 6.3) + 50 × 5		3 × (80 × 8) + 50 × 5		3 × (100 × 8) + 63 × 6.3		3 × (125 × 10) + 80 × 6.3		3 × [2(100 × 10)] + 80 × 8		3 × [2(125 × 10)] + 80 × 10	
互感器变比 高压侧 短路容量 (MV·A)		50/5	75/5	75/5	100/5	100/5	150/5	100/5	150/5	150/5	200/5	150/5	200/5	200/5	300/5
	10	D, yn11	1.74	1.68	1.53	1.51									
	Y, yn0	0.67	0.65	0.64	0.58										
20	D, yn11	2.04	1.98	1.96	1.92	1.74	1.68	1.53	1.51	1.38	1.35				
	Y, yn0	0.72	0.70	0.70	0.69	0.67	0.65	0.66	0.64	0.57	0.56				
30	D, yn11	2.37	2.26	2.16	2.12	1.88	1.81	1.75	1.70	1.58	1.55	1.48	1.46	1.32	1.28
	Y, yn0	0.74	0.72	0.72	0.70	0.70	0.68	0.68	0.67	0.60	0.59	0.59	0.58	0.56	0.54
50	D, yn11	2.52	2.48	2.40	2.33	2.05	2.01	1.98	1.92	1.82	1.78	1.70	1.64	1.53	1.50
	Y, yn0	0.76	0.74	0.74	0.72	0.72	0.70	0.71	0.69	0.63	0.62	0.62	0.61	0.59	0.58
75	D, yn11	2.59	2.51	2.45	2.40	2.15	2.09	2.06	2.02	1.93	1.89	1.83	1.79	1.65	1.60
	Y, yn0	0.76	0.74	0.75	0.73	0.73	0.71	0.73	0.70	0.64	0.63	0.64	0.63	0.61	0.59
100	D, yn11	2.62	2.55	2.51	2.46	2.15	2.08	2.06	2.00	1.93	1.88	1.83	1.80	1.68	1.63
	Y, yn0	0.77	0.75	0.75	0.74	0.74	0.72	0.73	0.72	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62	0.61
200	D, yn11	2.67	2.62	2.59	2.53	2.22	2.16	2.15	2.10	2.03	1.98	1.95	1.92	1.82	1.77
	Y, yn0	0.77	0.75	0.76	0.74	0.74	0.72	0.74	0.72	0.66	0.65	0.64	0.64	0.64	0.62
300	D, yn11	2.79	2.71	2.68	2.65	2.30	2.26	2.21	2.12	2.06	2.03	2.00	1.97	1.88	1.82
	Y, yn0	0.77	0.75	0.76	0.75	0.75	0.73	0.75	0.73	0.67	0.65	0.66	0.65	0.65	0.63
∞	D, yn11	2.83	2.72	2.61	2.57	2.32	2.23	2.27	2.21	2.16	2.12	2.10	2.05	1.98	1.93
	Y, yn0	0.78	0.76	0.77	0.75	0.75	0.73	0.75	0.73	0.72	0.71	0.67	0.66	0.66	0.64

敏系数影响很小。

### 3 Y, yn0 变压器用低压中性线上的零序电流保护作单相接地保护

当利用高压侧过电流保护兼作低压侧单相接地保护的灵敏系数不满足要求时,可采用低压侧中性线上的零序电流保护。保护装置的动作电流按躲过正常运行时变压器中性线上流过的最大不平衡电流(不超过额定电流的 25%)来整定。若低压分支线上装设零序电流保护,还须与之相配合。由于 Y, yn0 变压器低压侧短路电流比其 25% 的额定电流大得多,因此,灵敏系数均能满足要求。

### 4 Y, yn0 变压器利用接于低压的三相电流保护作单相接地保护

利用变压器低压侧总出线断路器上的过电流保护,分以下三种情况:

a. 若用它的瞬时过电流保护作单相接地保护,由于其整定值较大,灵敏系数肯定不能满足要求。

b. 若用它的短延时过电流保护,其灵敏系数是否满足要求主要取决于短延时过电流脱扣器的整定倍数(即整定电流与其额定电流的比,通常为 3~10),整定倍数越小,灵敏系数越大,反之越小。以  $S_9$  变压器为例,按高压侧短路容量为无穷大时的短路值<sup>[1]</sup>计算,其结果只有在整定倍数为 3 时,才有少数情况灵敏系数满足要求(不小于 1.5),整定倍数大于 3 时,均不满足要求。

c. 若用它的长延时过电流保护,虽然单相接地保护的灵敏系数能够满足要求,但因长延时过电流脱扣器是反时限特性且不可调,因此无法确定时限。

利用低压总出线断路器上的过电流保护,若单相接地故障发生在变压器与总出线断路器之间,则因故障电流不通过断路器而使其无法动作,从而出现死区。所以,笔者认为,利用低压总出线断路器上的三相电流保护作低压侧单相接地保护不合适。

此外,利用变压器低压侧总出线上的三个电流互感器接成三相星形,在其公用线上串接 GL 型过电流继电器构成零序电流保护,可以实现单相接地保护。但由于这三个电流互感器是用于测量的,而测量仪表不宜与保护共用电流互感器,所以,此方法不推

荐使用。

## 5 结论

a. 400 kV·A 及以上一次电压为 6~10 kV 的变压器,当绕组为 D, yn11 连接时,可利用高压侧过电流保护兼作低压侧单相接地保护,灵敏系数均能满足要求。

b. 变压器绕组为 Y, yn0 连接时,利用高压侧过电流保护,其灵敏系数大小主要取决于变压器的零序阻抗和其过负荷系数,而高压侧短路容量的大小对其影响很小,甚至可以忽略(系统阻抗)不计。

c. 对 Y, yn0 变压器,当利用高压侧过电流保护兼作低压侧单相接地保护的灵敏系数不满足要求时,应采用低压侧中性线上的零序电流保护,而不宜采用低压侧三相电流保护。

## 参考文献

- 1 中国航空工业规划设计研究院 组编. 工业与民用配电设计手册. 第三版. 北京: 中国电力出版社, 2005: 164-167.
- 2 水利电力部西北电力设计院. 工业企业继电保护. 北京: 水利电力出版社, 1985: 180, 181.
- 3 能源部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册(第 2 册). 第二版. 北京: 水利电力出版社, 1990: 691.

2008-06-03 来稿

2009-02-04 修回

## 欢迎订阅本刊合订本

本刊 2008 年合订本已开始发行,近年合订本尚存少许,欢迎读者订阅,价格见下表。

年	卷	定价(元/册)	年	卷	定价(元/册)
1999	18	20.00	2004	23	38.00
2000	19	26.00	2005	24	38.00
2001	20	26.00	2006	25	58.00
2002	21	26.00	2007	26	120.00
2003	22	38.00	2008	27	120.00

注: 1 上述价格已含邮费,若需挂号邮寄,每件加收 3.00 元。

2 书款通过邮局直汇我社,务请注明所购刊期、份数、收件人、详细地址及邮编等。

本社启