文章编号：1003-0417(2020)10-53-06

光伏电站中集电线路保护定值整定计算的探讨

顾星星[1*]，潘林俐[2]

(1. 华电江苏能源有限公司新能源分公司，南京 210000；
2. 重通成飞风电设备江苏有限公司，南通 226000)

摘　要：随着越来越多的光伏电站并入电网，光伏发电的不稳定性对电网的安全产生了重大影响，因此，做好继电保护工作，确保光伏电站安全、稳定地运行成为当前的重点，而光伏电站中集电线路保护的配置及整定计算是继电保护工作的一个重要环节。结合江苏某 110 kV 光伏电站中集电线路保护定值整定计算的实例，给出了光伏电站中集电线路保护配置方案和整定计算原则。

关键词：光伏电站；继电保护；集电线路；保护配置；整定计算

中图分类号：TK513.5　　**文献标志码**：A

0 引言

随着电网中光伏电力容量的增加，其对电网运行造成的影响也越来越突出。由于光伏电站具有特殊的接线方式、运行方式和运行环境，因此研究光伏电站的保护配置与整定计算，对光伏电站的稳定运行及故障切除等方面具有重要意义。本文根据江苏某 110 kV 光伏电站中集电线路保护定值的整定计算实例，研究了光伏电站中集电线路保护配置方案与整定计算原则。

1 江苏某光伏电站概述

江苏某 110 kV 光伏电站的装机容量为 73.5 MW，包含 98 台 0.75 MW 的光伏逆变器，逆变器的出口电压为 315 V。该光伏电站通过 6 条集电线路汇集到 35 kV 母线，然后经光伏电站主变压器将电压升高到 110 kV。该光伏电站的一次主接线示意图如图 1 所示。

1.1 系统参数

该光伏电站的 110 kV 母线等效阻抗值如表 1 所示。

表 1　110 kV 母线等效阻抗表

Table 1　Equivalent impedance of 110 kV busbar

名称	系统的最大运行方式		系统的最小运行方式	
	正序阻抗	零序阻抗	正序阻抗	零序阻抗
110 kV 母线	0.1209	0.2101	0.2252	0.3767

选择 100 MVA 作为基准容量，则各电压等级下的计算基准值如表 2 所示。其中，I_{js} 为各电压等级短路电流计算的基准值；Z_{js} 为各电压等级阻抗计算的基准值。

表 2　光伏电站各电压等级下的计算基准值表

Table 2　Calculating reference value under each voltage grade of PV power station

标称名称	230 kV	115 kV	37 kV	315 V
I_{js}/kA	0.251	0.502	1.560	183.286
Z_{js}/Ω	529.000	132.250	13.690	0.000992

1.2 主设备参数

该光伏电站升压站共安装 2 台 50 MVA 两卷主变压器 (带平衡线圈)。1# 主变压器 110 kV 侧为直接接地方式，35 kV 侧为经小电阻接地方式；2# 主变压器 110 kV 侧为经放电间隙接地方

收稿日期：2019-11-14

通信作者：顾星星 (1993—)，男，本科、助理工程师，主要从事新能源发电运行与维护方面的工作。1432373382@qq.com

2020-10杂志.indd　53　　2020-10-27　18:46:43

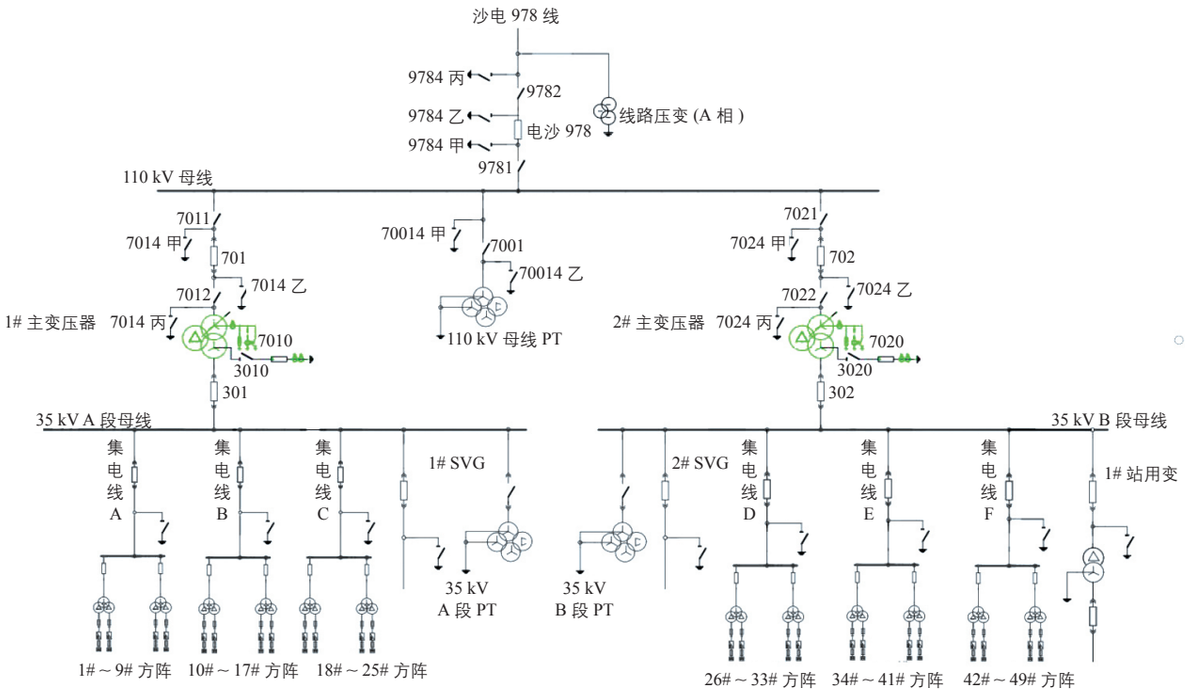


图 1 江苏省某光伏电站一次主接线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of primary main wiring of a PV power station in Jiangsu Province

式，35 kV 侧为经小电阻接地方式。35 kV 系统单母线分段接线形式，线路共计 6 回，通过 110 kV 单母线送至电网。各主设备的具体规格参数如表 3 ~表 5 所示。

表 3 110 kV 主变压器的规格参数表

Table 3 Specifications and parameters of 110 kV main transformer

名称	技术规范
型号	SZ11-50000/110
额定容量	50000 kVA
连接组标号	YN、Yn0、d11
短路阻抗	$U_{1\text{-}2}$=10.5%，$U_{1\text{-}3}$=17.5%，$U_{2\text{-}3}$=6.5%
35 kV 中性点接地电阻	202 Ω

注：$U_{1\text{-}2}$、$U_{1\text{-}3}$、$U_{2\text{-}3}$ 分别代表三绕组变压器两两间的短路电压

要进行集电线路保护定值的整定计算，必须要掌握各主设备的等效阻抗、不同短路故障点的短路电流。下文对此进行具体计算分析。

表 4 35 kV 箱式变压器的规格参数表

Table 4 Specifications and parameters of 35 kV box transformer

名称	技术规范
型号	S11-1600
额定容量	1600/800-800 kVA
连接组标号	Y、d11、d11
短路阻抗	$U_{1\text{-}2'}$=6%，$U_{1\text{-}2''}$=6%，K_f=3.5

注：$U_{1\text{-}2'}$、$U_{1\text{-}2''}$ 分别为高压绕组与一个低压绕组间的短路电压；K_f 为分裂系数

表 5 35 kV 集电线路 A 的规格参数表

Table 5 Specifications and parameters of 35 kV collecting power line

名称	技术规范
线路型号	ZRC-YJV22-26/35kV 3*70
长度	1.46 km
正序单位阻抗	0.319+j0.078
CT 变比	300/5
零序 CT 变比	100/5

注：0.319 为电阻标幺值；0.078 为电抗标幺值

2 主设备的等效阻抗计算

2.1 1#/2#110 kV 主变压器的阻抗标幺值

选取系统容量 S_B 为 100 MVA，计算 1#/2#

2020-10杂志.indd 54　　2020-10-27 18:46:44

110 kV 主变压器的阻抗标幺值。

$$U_{110}=\frac{1}{2}(U_{1\text{-}2}+U_{1\text{-}3}-U_{2\text{-}3})=10.75\% \tag{1}$$

$$U_{35}=\frac{1}{2}(U_{1\text{-}2}+U_{2\text{-}3}-U_{1\text{-}3})=-0.25\% \tag{2}$$

$$U_{10.5}=\frac{1}{2}(U_{1\text{-}3}+U_{2\text{-}3}-U_{1\text{-}2})=6.75\% \tag{3}$$

$$X^*_{110}=U_{110}\frac{S_B}{S_N}=10.75\%\times\frac{100}{50}=0.215 \tag{4}$$

$$X^*_{35}=U_{35}\frac{S_B}{S_N}=-0.25\%\times\frac{100}{50}=-0.005 \tag{5}$$

$$X^*_{10.5}=U_{10.5}\frac{S_B}{S_N}=6.75\%\times\frac{100}{50}=0.135 \tag{6}$$

式中，U_{110}、U_{35}、$U_{10.5}$ 分别为主变压器 110 kV 侧、35 kV 侧、10 kV 侧的短路电压；X^*_{110}、X^*_{35}、$X^*_{10.5}$ 分别为主变压器 110 kV 侧、35 kV 侧、10 kV 侧的等效阻抗；S_N 为各个设备的额定容量，取值参照表 3～表 5。

2.2 35 kV 箱式变压器的阻抗标幺值

计算 35 kV 箱式变压器的阻抗标幺值。

$$U_{1\text{-}2}=\frac{U_{1\text{-}2'}}{1+\frac{1}{4}K_f}=\frac{6\%}{1+\frac{1}{4}\times3.5}=3.2\% \tag{7}$$

$$U_{2'\text{-}2''}=K_fU_{1\text{-}2}=3.5\times3.2\%=11.2\% \tag{8}$$

$$U_{2'}=U_{2''}=\frac{1}{2}U_{2'\text{-}2''}=5.6\% \tag{9}$$

$$U_1=U_{1\text{-}2}-\frac{U_{2'}}{2}=3.2\%-\frac{5.6\%}{2}=0.4\% \tag{10}$$

$$X^*_{T1}=U_1\frac{S_B}{S_N}=0.4\%\times\frac{100}{1.6}=0.25 \tag{11}$$

$$X^*_{T2'}=X^*_{T2''}=U_{2'}\frac{S_B}{S_N}=5.6\%\times\frac{100}{1.6}=3.5 \tag{12}$$

式中，$U_{1\text{-}2}$ 为高压绕组与总低压绕组间的短路电压；$U_{2'\text{-}2''}$ 为分裂绕组间的短路电压；$U_{2'}$、$U_{2''}$ 分别为双绕组变压器低压侧分裂绕组的等效电压；U_1 为双绕组变压器高压侧的等效电压；X^*_{T1} 为双绕组变压器高压侧的等效阻抗；$X^*_{T2'}$、$X^*_{T2''}$ 均为双绕组变压器低压侧的等效阻抗。

2.3 35 kV 集电线路 A 的阻抗标幺值

计算 35 kV 集电线路 A 的阻抗标幺值。其中，X_R 为集电线路 A 电缆线路每 km 的电阻值，X_R=0.319×1.46=0.466；X_L 为集电线路 A 电缆线路每 km 的电抗值，X_L=0.078×1.46=0.114。

$$X^*_R=X_R\frac{S_B}{U^2_{av}}=0.466\times\frac{100}{37^2}=0.034 \tag{13}$$

$$X^*_L=X_L\frac{S_B}{U^2_{av}}=0.114\times\frac{100}{37^2}=0.0083 \tag{14}$$

$$Z^*=0.034+j0.0083 \tag{15}$$

式中，X^*_R 为集电线路 A 的阻抗标幺值的电阻部分；X^*_L 为集电线路 A 的阻抗标幺值的电抗部分；Z^* 为集电线路 A 的阻抗标幺值；U_{av} 为系统平均电压。

3 短路电流的计算

计算系统最小运行方式下的短路电流。根据表 2，此时短路电流计算的基准值 I_{js} 取 1.560 kA。

1)K_1 点：35 kV 母线最小两相短路电流 $I^{(2)}_{k.min.K1}$ 为：

$$I^{(2)}_{k.min.K1}=0.866\frac{I_{js}}{Z_{1\Sigma.K1}}=0.866\times\frac{1.560}{0.2252+0.215-0.005}=3104.23\ \text{A} \tag{16}$$

式中，$Z_{1\Sigma.K1}$ 为 K_1 点的总正序阻抗标幺值。

2)K_2 点：集电线路 A 最末端 35 kV 最小两相短路电流 $I^{(2)}_{k.min.K2}$ 为：

$$I^{(2)}_{k.min.K2}=0.866\frac{I_{js}}{Z_{1\Sigma.K2}}=0.866\times\frac{1.560}{0.2252+0.215-0.005+0.0350}=2873.16\ \text{A} \tag{17}$$

式中，$Z_{1\Sigma.K2}$ 为 K_2 点的总正序阻抗标幺值。

3)K_3 点：集电线路 A 最末端箱式变压器低压侧 315 V 处最小两相短路电流 $I^{(2)}_{k.min.K3}$（折算到 35 kV 侧）为：

$$I^{(2)}_{k.min.K3}=0.866\frac{I_{js}}{Z_{1\Sigma.K3}}=0.866\times\frac{1.560}{0.2252+0.215-0.005+0.0350+3.5+0.25}=320.12\ \text{A} \tag{18}$$

式中，$Z_{1\Sigma.K3}$ 为 K_3 点的总正序阻抗标幺值。

2020-10杂志.indd　55　　2020-10-27　18:46:45

4 集电线路 A 保护定值的整定计算

前文已计算出各主设备的等效阻抗值，以及不同短路故障点的短路电流值，从而进行集电线路 A 的保护定值的整定计算。

4.1 集电线路 A 过流保护Ⅰ段

根据 GB/T 32900-2016《光伏发电站继电保护技术规范》[1]，整定原则 1 为：按对本线路最末端相间故障有灵敏度进行整定，灵敏系数 K_{sen} 取 1.5。

按整定原则 1，集电线路 A 过流保护I段的整定值 $I_{op.1}$ 为：

$$I_{op.1}=\frac{I_{js}}{Z_{1\Sigma.K3}}=\frac{I^{(2)}_{k.min.K2}}{K_{sen}n_{TA}}=\frac{2873.16}{1.5\times60}=31.92\ \text{A} \quad (19)$$

式中，n_{TA} 为 35 kV 集电线路 A 的 CT 变比，根据表 5，此处取 300/5。

根据文献 [2]，整定原则 2 为：按躲过集电线路 A 最末端箱式变压器低压侧故障的三相短路电流 $I^{(3)}_{k.max}$（最大短路电流）整定，可靠系数 K_{rel} 取 1.2。

按整定原则 2，集电线路 A 过流保护I段的整定值 $I_{op.1}$ 为：

$$I^{(3)}_{k.max}=\frac{I_{js}}{Z_{1\Sigma.K3}}=\frac{1.560}{0.1209+0.215-0.005+0.035+3.5+0.25}=379.02\ \text{A} \quad (20)$$

$$I_{op.1}=\frac{K_{rel}I^{(3)}_{k.max}}{n_{TA}}=\frac{1.2\times379.02}{60}=7.58\ \text{A} \quad (21)$$

针对整定原则 2 的结果进行灵敏度校验：按系统最小运行方式下，箱式变压器内部线圈 1/2 处两相短路故障进行校核。此时的最小两相短路电流 $I^{(2)}_{k.min}$ 为：

$$I^{(2)}_{k.min}=0.866\frac{I_{js}}{Z_{1\Sigma}}=0.866\times\frac{1.560}{0.2252+0.215-0.005+0.035+\frac{1}{2}(3.5+0.25)}=576.05\ \text{A} \quad (22)$$

式中，$Z_{1\Sigma}$ 为箱式变压器内部线圈 1/2 处两相短路时的总正序阻抗标幺值。

则 K_{sen} 为：

$$K_{sen}=\frac{I^{(2)}_{k.min}}{n_{TA}I_{op.1}}=\frac{576.05}{60\times7.58}=1.27 \quad (23)$$

计算得到的 K_{sen}=1.27，大于 1.2，根据文献 [2]，该值基本符合要求。

文献 [2] 指出，按整定原则 1 整定集电线路 A 过流保护I段能够保护线路全长，灵敏性较好，但选择性较差，需重点考虑过流保护I段和箱式变压器保护之间的配合问题；按整定原则 2 整定集电线路 A 过流保护I段，能基本保证集电线路 A 和箱式变压器保护之间的选择性关系，但需要考虑集电线路 A 过流保护I段和箱式变压器保护之间的时间配合关系，以确保保护的选择性。

由于该光伏电站采用油浸式箱式变压器，其瓦斯保护因高压侧开关需手动操作不能电动跳闸而失去非电量主保护功能。因此，另经短路电流计算，当 35 kV 箱式变压器低压侧 315 V 处三相短路时，故障电流为 44.52 kA；考虑非周期分量影响，故障 0 s 切除瞬间冲击电流为 111.3 kA，0 s 切除瞬间的冲击电流远大于光伏专用万能式空气断路器额定短时耐受电流 50 kA，属于安全隐患。因此，在该光伏电站 35 kV 集电线路保护定值的整定计算过程中，需考虑使其保护范围尽可能覆盖箱式变压器，因此集电线路 A 过流保护I段的整定值选择按整定原则 2 进行整定。

综上所述，集电线路 A 过流保护I段整定后的动作值取 7.58 A，动作时间取 0 s，出口方式为跳闸。

4.2 集电线路 A 过流保护Ⅱ段

根据 GB/T 32900-2016《光伏发电站继电保护技术规范》[1]，整定原则为：按躲过集电线路箱式变压器投运过程中最大负荷电流 $I_{loa.max}$ 进行整定，$I_{loa.max}$=25.1×9=225.9 A，K_{rel} 取 1.15。

按此原则，集电线路 A 过流保护Ⅱ段的整定值 $I_{op.2}$ 为：

$$I_{op.2}=\frac{K_{rel}I_{loa.max}}{n_{TA}}=\frac{1.15\times225.9}{60}=4.33\ \text{A} \quad (24)$$

灵敏度校验：按系统最小运行方式下，箱式变压器低压侧 315 V 处两相短路故障进行校核。

从式 (18) 可知，此时 $I^{(2)}_{k.min.K3}$ 的值为 320.12 A，则 K_{sen} 为：

2020-10杂志.indd　56　　2020-10-27　18:46:46

$$K_{sen}=\frac{I^{(2)}_{k.min.K3}}{n_{TA}I_{op.2}}=\frac{320.12}{60\times4.33}=1.23 \quad (25)$$

计算得到的 K_{sen}=1.23，根据 GB/T 32900-2016《光伏发电站继电保护技术规范》[1]，该值大于 1.2，基本符合要求。

综上所述，集电线路 A 过流保护Ⅱ段整定后的动作值取 4.33 A，动作时间取 0.3 s，出口方式为跳闸。

4.3 过负荷保护

根据 GB/T 32900-2016《光伏发电站继电保护技术规范》[1]，整定原则为：按躲过集电线路箱式变压器投运过程中最大负荷电流 $I_{loa.max}$ 进行整定，$I_{loa.max}$ 取 225.9 A，K_{rel} 取 1。

按此原则，过负荷保护的整定值 I_{gfh} 为：

$$I_{gfh}=\frac{K_{rel}I_{loa.max}}{n_{TA}}=\frac{1\times225.9}{60}=3.77\ \text{A} \quad (26)$$

因此，过负荷保护整定后的动作值取 3.77 A，动作时间取 7 s，出口方式为发信号告警。

4.4 零序电流Ⅰ段

根据 GB/T 32900-2016《光伏发电站继电保护技术规范》[1]，整定原则为：按对本线路末端单相接地故障有灵敏度，以 $K_{sen}\geqslant2$ 进行整定。

当集电线路 A 末端发生单相接地时，零序电流I段的整定值为：

$$Z^*_{0\Sigma}=0.3767+0.215-0.005+0.035=0.6217 \quad (27)$$

$$Z^*_{1\Sigma}=0.2252+0.215-0.005+0.035=0.4702 \quad (28)$$

$$R^*=\frac{R}{Z_{js}}=\frac{202}{13.69}=14.755 \quad (29)$$

$$(3I_0)^*=3\frac{1}{2Z^*_{0\Sigma}+Z^*_{1\Sigma}+3R^*}=0.0652 \quad (30)$$

$$3I_0=I_{js}(3I_0)^*=1.56\times0.0652=101.712\ \text{A} \quad (31)$$

$$(3I_0)_{op.1}=\frac{3I_0}{K_{sen}n_{TA}}=\frac{101.712}{2\times20}=2.54\ \text{A} \quad (32)$$

式中，$Z^*_{0\Sigma}$为集电线路末端的零序总阻抗 (标幺值)；$Z^*_{1\Sigma}$为集电线路末端的正序总阻抗 (标幺值)；R^* 为中性点接地电阻 (标幺值)；$(3I_0)^*$ 为零序电流I段的整定值 (标幺值)；$3I_0$ 为零序电流I段的整定值一次值 (有名值)；$(3I_0)_{op.1}$ 为零序电流I段的整定值二次值 (有名值)；n_{TA} 根据表 5，此处取值为 100/5。

由于 35 kV 集电线路 A 存在雷击误动隐患，因此零序电流I段的动作时间取 0.2 s。

综上所述，零序电流I段整定后的动作值取 2.54 A，动作时间取 0.2 s，出口方式为跳闸。

4.5 零序电流Ⅱ段

根据 GB/T 32900-2016《光伏发电站继电保护技术规范》[1]，整定原则为：按可靠躲过本线路的自身电容电流进行整定，K_{rel} 取 2。

电缆线路的零序电容电流 I_c 的计算式为：

$$I_c=0.1U_eL=0.1\times37\times1.46=5.402\ \text{A} \quad (33)$$

$$(3I_0)_{op.2}=\frac{K_{rel}I_c}{n_{TA}}=\frac{2\times5.402}{20}=0.54\ \text{A} \quad (34)$$

式中，U_e 为电力线路的额定电压；L 为电力线路的长度；n_{TA} 根据表 5，此处取值为 100/5。

综上所述，零序电流Ⅱ段整定后的动作值取 0.54 A，动作时间取 0.5 s，出口方式为跳闸。

4.6 小结

通过上述整定计算的方法，对某光伏电站 35 kV 集电线路保护进行了整定计算，该光伏电站 35 kV 集电线路自投运以来，整定计算合理，继电保护装置未有任何不正确的拒动和误动，其作为光伏电站的第一道防线，很好地保障了设备安全、稳定的运行。

5 结论

本文结合实例，对中低压侧为低电阻接地系统的光伏电站的集电线路保护定值的整定计算给出了相应的短路电流分析及集电线路保护定值整定计算原则。通过对并网光伏电站的集电线路继电保护配置和整定计算进行探究，能够有效保障光伏电站持续、安全、稳定地运行。

[参考文献]

[1] 中国电力企业联合会 . 光伏发电站继电保护技术规范 : GB/T 32900-2016[S]. 北京 : 中国标准出版社 , 2016.

[2] 毕天妹 , 李彦宾 , 马丽红 , 等 . 风场及其送出线保护配置与整定研究 [J]. 电力系统保护与控制 , 2014, 42(5): 45 － 50.

2020-10杂志.indd　57　　2020-10-27　18:46:47

DISCUSSION ON SETTING CALCULATION OF PROTECTION SETTING VALUE OF COLLECTING POWER LINE IN PV POWER STATION

Gu Xingxing[1]，Pan Linli[2]

(1. *Huadian Jiangsu Energy Co.，Ltd.，New Energy Branch，Nanjing* 210000，*China*；
2. *Chongtong Chengfei Wind Power Equipment Jiangsu Co.，Ltd.，Nantong* 226000，*China*)

Abstract：With the establishment of more and more grid-connected PV power stations，the instability of PV power generation has a significant impact on the safety of the power grid. Reliable relay protection is the key issue to ensure the safe and stable operation of PV power stations. The configuration and setting calculation of collecting power line protection in PV power station are important parts of relay protection work. In this paper，taking a setting calculation of protection setting value of collecting power line in a 110 kV PV power station as an example in Jiangsu Province，the protection configuration scheme and setting calculation principle of collecting power line in PV power station are given.

Keywords：PV power station；relay protection；collecting power line；protection configuration；setting calculation

2020-10杂志.indd　58　　2020-10-27　18:46:47