

并网光伏电站中性点接地电阻选择与零序保护

李政¹, 卢继平¹, 刘加林¹, 何潜²

(1. 重庆大学 电气工程学院 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;
2. 国网重庆市电力公司, 重庆 401120)

摘要:在保障人身和设备安全的前提下,基于零序电流随中性点电阻的变化特性分析,综合站内各级线路零序保护的选择性和灵敏性要求,提出了一种计及光伏源非线性助增和保护动作性能的中性点接地电阻选取方法。针对保护的不同配置,该方法都可以得到兼顾一次系统安全和二次保护性能的电阻取值。最后通过实际工程算例,给出了详细的电阻选择及保护整定方案,验证了所提方法的正确性和可行性。

关键词:光伏电站;中性点接地电阻;零序电流特性;光伏非线性助增;继电保护;保护动作性能

中图分类号:TM 615; TM 771

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201911022

0 引言

集中式并网光伏电站广泛采用中性点经电阻接地的运行方式,要求保护能够快速切除接地故障^[1],因此,研究并网光伏电站的故障电流特征,分析故障电流对保护动作性能的影响具有重要意义^[2-3],其也是中性点接地电阻合理选择的基础。

光伏为逆变型分布式电源IIDG(Inverter Interfaced Distributed Generator),目前关于IIDG接入对配电网故障影响的研究主要集中在相间短路及其保护方面。文献[4-5]给出了计及并网规程的含单个IIDG配电网相间短路的故障电流计算方法。文献[6-7]建立了计及故障穿越的压控电流源模型,并给出了含多个IIDG配电网的相间短路故障分析方法。文献[8]分析了配网发生相间短路故障时IIDG接入对短路电流分布的影响,得出IIDG接入可能引起配网保护错误动作的结论。前述研究均针对相间短路故障,未计及零序。然而,在中性点经电阻接地的并网IIDG系统发生接地短路故障时,由于零序网络的变化,故障特性有所不同,这方面的研究还比较少。文献[9]研究了旋转型分布式电源(DG)对小电阻接地系统接地故障特征的影响,旋转型DG等效为电压源,但是应用更为广泛的IIDG受控制策略影响等效为电流源。文献[10-11]将IIDG等效为正序电压控制的电流源,并分别提出了可行的接地故障零序电流计算方法。文献[11]还进一步分析了IIDG对馈线零序电流保护的影响,得出IIDG对零序电流有助增作用,可能导致保护误动的结论。文献[12]研究了分布式光伏接入对发生单相接地故障后网络的变压器中性点电压偏移的影响,并提出了含有DG的配网保护的改进方法,有重要的工程意义。

现有的含IIDG并网系统的中性点电阻选择依然沿用城市配网中的选取原则^[13-16],现有原则已充分考虑一次系统的安全,但未对二次保护做深入分析,尤其在计算故障零序时仅考虑系统电源,而将IIDG作为负载看待,这势必带来较大的计算误差,文献[11]的算例中2个IIDG对零序电流的助增量超过14%。本文在一次系统安全方面沿用已有的城市配网中的中性点电阻选取原则,得出一个较大的电阻选取范围;分析了含光伏压控电流源^[17]的配网接地故障以及光伏源通过影响序网电压助增零序电流的原理,并得到零序电流随中性点电阻和光伏电流波动的变化特性;基于此,结合零序保护的配合关系和选择性及灵敏性分析,进一步修正由一次系统安全得出的电阻选取范围,由此得到计及光伏助增效应的兼顾一次系统安全和二次保护性能的中性点接地电阻选取范围;最后结合工程算例给出具体的整定计算。

1 沿用现有原则的一次安全阻值范围

总体而言,考虑一次安全的阻值选取分为限制弧光过电压倍数、考虑对通信线路的干扰和保障人身安全3个方面。

1.1 限制弧光过电压倍数

中性点通过电阻接地限制弧光过电压倍数,原理是一种电阻耗能作用,当发生单相接地故障时,故障点电弧从熄灭到重燃的半个工频周期内,对地电容中的电荷通过中性点电阻 R_g 向大地释放,从而使过电压降低。电容电荷泄放速度取决于比值 k ^[14]:

$$k = I_R / I_C \quad (1)$$

其中, I_R 为单相接地时流过 R_g 的电流; I_C 为系统的对地电容电流。取 $k \in [1, 4]$,过电压倍数为1.8~2.6,当 $k > 4$ 时, k 值的增加对降低过压的效果不再明显。

I_R 可用以下近似公式求得:

$$I_R \approx U_\varphi / R_g \quad (2)$$

其中, U_φ 为系统相电压。

收稿日期:2019-04-21;修回日期:2019-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577018)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577018)

为限制弧光过电压,电阻电流 I_R 的最小值 $I_{R.min}$ 取为 kI_C ,故中性点接地电阻 R_g 应满足:

$$R_g \leq U_\varphi / I_{R.min} \quad (3)$$

1.2 减小对通信的干扰和保障人身安全

从对通信线路的干扰方面考虑,上海市供电公司35 kV接地短路电流为1.2 kA的系统分别进行测试,其电磁感应电压均符合DL/T 5033—2006的规定^[15]。

考虑人身安全,深圳市供电公司35 kV中性点经15 Ω电阻接地系统进行测试,发生单相接地故障时的跨步电压和接触电压不会危及人身安全,青岛市供电公司在此基础上将电阻电流设为1300 A,未发现因跨步电压和接触电势过高引起人身伤亡的事故^[2]。

综上所述,将电阻电流 I_R 的最大值 $I_{R.max}$ 限制在1300 A以内,可以满足减小对通信的干扰和保障人身安全的要求。因此中性点接地电阻 R_g 应满足:

$$R_g \geq U_\varphi / I_{R.max} \quad (4)$$

限制弧光过电压需要较大的故障电流来释放电荷,而降低对通信线路的干扰和保障人身安全则要求电流不能过大,式(3)和式(4)分别决定了 R_g 的上限和下限。

2 接地故障分析

2.1 单相接地短路故障计算

小电阻接地系统的馈线保护一般配置为:当发生单相接地故障时,由零序电流保护动作;当发生两相短路及两相接地故障时,由相电流保护动作^[11]。故本文的分析讨论只针对单相接地故障。

图1为中性点经电阻接地的光伏站并网系统。其中, E_s 为系统电源; Z_{S110} 为系统阻抗;线路MK的正、负序阻抗相等,均为 Z_{MK} ,其零序阻抗为 $3Z_{MK}$;线路KN的正、负序阻抗相等,均为 Z_{KN} ,其零序阻抗为 $3Z_{KN}$;升压变 T_1 的变比为110 kV/35 kV,接线方式为 $Y_g/d11$,35 kV侧为三角形接线,所以由接地变压器 T_g 经电阻 R_g 接地。PVS₁和PVS₂为系统内的光伏站PVS(PV Station), N 和 M 分别为PVS₁和PVS₂的汇集母线,容量较小的PVS₁通过一段35 kV联络线路送出至升压站 T_1 ,而大容量的PVS₂就地升压,集电线直接连至升压变 T_1 的低压侧母线 M 。

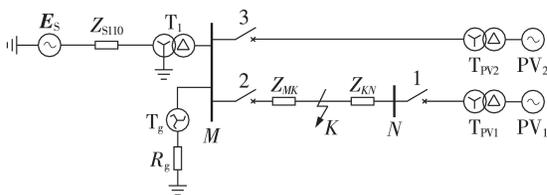


图1 联络线路故障等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of tie-line with fault on tie-line

当联络线 MN 上点 K 发生短路故障时,光伏站等效为大容量的IIDG,如图1中的 PV_1 和 PV_2 所示,在故障序网中呈现由并网点正序电压控制的受控电流源特性^[11]。图1中, PV_1 、 PV_2 给电网注入正序电流,结合边界条件,得复合序网如图2所示。

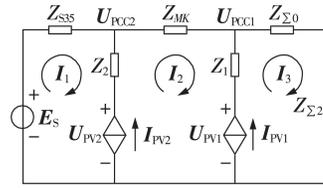


图2 单相接地短路故障复合序网

Fig.2 Composite network of single-phase grounding short circuit fault

图2中, $Z_{S35}=Z_{S110}+Z_{T1}$; $Z_1=Z_{KN}+Z_{TPV1}$; $Z_2=Z_{TPV2}$; $Z_{\Sigma 2}$ 和 $Z_{\Sigma 0}$ 分别为负序和零序综合阻抗, $Z_{\Sigma 0}=Z_{Tg}+3R_g+3Z_{MK}$, $Z_{\Sigma 2}=Z_{S35}+Z_{MK}$, Z_{Tg} 为接地变 T_g 的零序阻抗。文献[17]给出了光伏受控电流源 I_{PV} 的数学模型如下:

$$I_{PV} = \frac{(P^* + Q^* e^{-j\pi/2})U_{PV}}{|U_{PV}|^2} \quad (5)$$

其中, P^* 、 Q^* 分别为有功、无功参考值; U_{PV} 为故障后光伏源的端电压相量。

结合并网规定对光伏源的无功支撑要求和逆变器的容量约束,无功、有功参考值分别为:

$$Q^* = \eta \left[Q_0^* + \sqrt{S_n^2 - (Q_0^*)^2} \left(1 - \frac{U_{PV}}{U_n} \right) \right] \quad 0 < Q^* < S_n \quad (6)$$

$$P^* = \begin{cases} \eta P_0^* & P_0^* \in \left[0, \sqrt{S_n^2 - (Q^*)^2} \right] \\ \eta \sqrt{S_n^2 - (Q^*)^2} & P_0^* \notin \left[0, \sqrt{S_n^2 - (Q^*)^2} \right] \end{cases} \quad (7)$$

其中, U_{PV} 为故障后光伏电源端电压的正序分量幅值; S_n 、 U_n 和 I_n 分别为逆变器额定容量、电压和电流; $\eta = U_{PV} I_{max} / (U_n I_n)$,为故障后逆变器的容量系数, I_{max} 为逆变器最大允许电流,一般取为 $1.2I_n$; P_0^* 和 Q_0^* 分别为正常运行时的有功和无功参考值。

对图2所示的复合序网,由回路电流法可得方程组如下:

$$\begin{cases} f_1 = Z_{S35} I_1 - E_s + U_{PCC2} \\ f_2 = Z_{MK} I_2 - U_{PCC2} + U_{PCC1} \\ f_3 = (Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}) I_3 - U_{PCC1} \\ U_{PCCi} = U_{PV_i} - Z_i I_{PV_i} \\ I_i = I_{k0} - \sum_{j=1}^{3-i} I_{PV_j} \quad i=1,2 \end{cases} \quad (8)$$

然后联立 PV_1 、 PV_2 各自的电流和有功、无功,共 $3+2 \times 3=9$ 个方程, $x=[I_{k0} \ I_{PV_i} \ U_{PV_i} \ P_{PV_i}^* \ Q_{PV_i}^*](i=1,2)$,共包含9个未知数,可以求解。

由于光伏电流源端电压和电流之间呈非线性耦

合关系,无法由解析法求解。本文采用牛顿-拉夫逊迭代求解,迭代计算精度的误差门限值设为 10^{-5} 。

由回路方程组(式(8))可推导出零序电流 I_{k0} 为:

$$I_{k0} = \frac{E_S + (Z_{MK} + Z_{S35})I_{PV1} + Z_{S35}I_{PV2}}{2Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} \quad (9)$$

式(9)的分子即为系统电源和光伏源共同作用的综合电源,下面分析该综合电源的生成。

2.2 光伏电流源对零序电流的影响分析

电网发生故障后,光伏逆变器迅速调节输出电流跟踪参考电流达到故障稳态,在此故障稳态时刻,系统电源为恒压源,光伏受控电流源达到一个相对的稳态,可视作恒流源,因此,系统电压源和光伏电流源的综合作用的等效电源如图3所示。

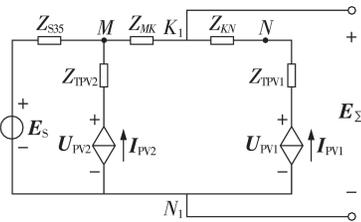


图3 综合电源等效

Fig.3 Equivalent integrated power supply

利用叠加定理,分别求出系统电源 E_S 和光伏电流源 I_{PV1} 、 I_{PV2} 单独作用时的等效电源,即可得系统故障时序网的综合电源 E_{Σ} 。

光伏电流源 I_{PV1} 独立等效如附录A中的图A1所示。图中, $Z_{PV1} = Z_{S35} + Z_{MK}$; $E_{PV1} = Z_{PV1} I_{PV1}$ 。同理可得 $Z_{PV2} = Z_{S35}$ 、 $E_{PV2} = Z_{PV2} I_{PV2}$,因此有:

$$E_{\Sigma} = E_S + Z_{PV1} I_{PV1} + Z_{PV2} I_{PV2} \quad (10)$$

式(10)为式(9)的分子,即综合电源 E_{Σ} ,由此可知,光伏电流源虽然不直接输出零序电流,但会改变故障序网的综合电势,从而间接影响零序电流。

由于系统和线路正序阻抗呈强感性,因此光伏电流源对零序电流必然起助增作用^[11]。

2.3 单相接地故障特性

对图1所示的系统分析故障特性,模型参数为: $P_0^* = 0.8 \text{ p.u.}$ 、 $Q_0^* = 0.6 \text{ p.u.}$ ^[17],网络参数详见附录B。

由第1节的一次安全原则确定 R_g 取值,具体如下。

(1)限制弧光过电压,确定上限。

系统共7回集电线,其中电缆单位长度电容电流按经验值 2.81 A/km 计算,则总对地电容电流 $I_{C\Sigma} = 7 \times 5 \times 2.81 \approx 98 \text{ (A)}$,取 $k=1$,则 $I_{R,\min} = 1 \times I_{C\Sigma}$,限制过电压的电阻上限为: $R_g \leq U_{\varphi} / I_{R,\min} \approx 200 \Omega$ 。

(2)保障人身安全,确定下限。

取 $I_{R,\max} = 1300 \text{ A}$,由式(4)可得 $R_g \geq 15 \Omega$ 。由此可得 $R_g \in [15, 200] \Omega$ 时可保证一次系统安全。

光伏电站的运行不可避免地存在波动性,光伏电池板的局部阴影(由乌云、灰尘、树叶、环绕的树或建

筑等引起)会大幅降低光伏输出电流^[18]。为此,分析中加入了由局部阴影造成的光伏功率损耗变化。

本文设计了以下3种故障场景,后续的故障特性都将基于这3种场景进行分析。

(1)场景1:线路MN末端发生单相接地故障, PV_1 容量 S_{nPV1} 不变,恒定为 20 MW ; PV_2 容量 S_{nPV2} 在 $10 \sim 50 \text{ MW}$ 范围内变化; $R_g \in [10, 200] \Omega$ 。

(2)场景2:线路MN中点发生单相接地故障, PV_2 容量 S_{nPV2} 恒定为 50 MW ; PV_1 因局部阴影造成功率损耗,功率损耗系数变化范围为 $0 \sim 99.98 \%$ ^[18], $R_g \in [10, 200] \Omega$ 。

(3)场景3:单相接地故障点K从线路MN首端往末端移动, $S_{nPV1} = 20 \text{ MW}$, $S_{nPV2} = 50 \text{ MW}$,均保持不变,且按无功率损耗考虑, $R_g \in [10, 200] \Omega$ 。

2.3.1 光伏电流源故障特性

(1)场景1下, PV_1 和 PV_2 的故障输出电流变化特性如图4所示。图4(b)中, $I_{PV1,PU}$ 、 $I_{PV2,PU}$ 分别为每单位容量的 PV_1 、 PV_2 输出电流。

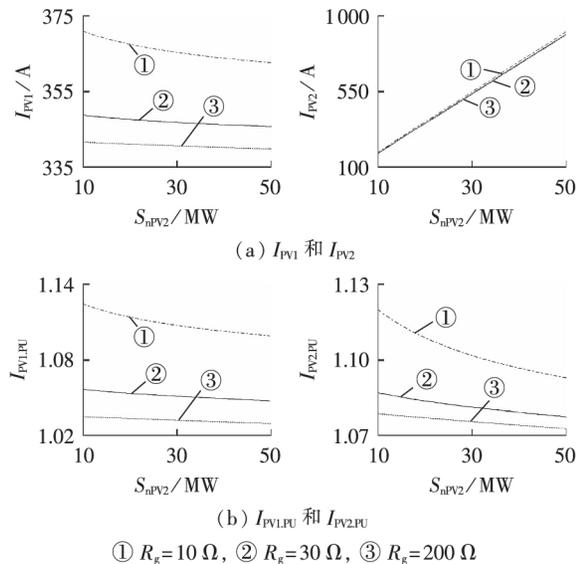


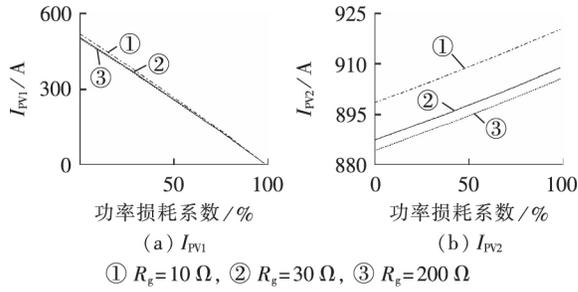
图4 光伏输出电流随光伏站容量和 R_g 的变化特性

Fig.4 Characteristic of PV output current varying with S_n and R_g

由图4(a)可见,随着 PV_2 容量 S_{nPV2} 的增大, PV_2 输出电流 I_{PV2} 增大, PV_1 (容量不变)输出电流 I_{PV1} 有所减小,这是因为接入系统的光伏总容量增大,单位容量光伏源的输出电流减小,使得光伏源的故障穿越和对电网支撑能力增强,这同样反映在标么值的变化趋势中。图4(b)反映出在控制策略作用下,每单位容量的 PV_1 的输出电流 $I_{PV1,PU}$ 和每单位容量的 PV_2 的输出电流 $I_{PV2,PU}$ 均在限值 1.2 p.u. 之内。

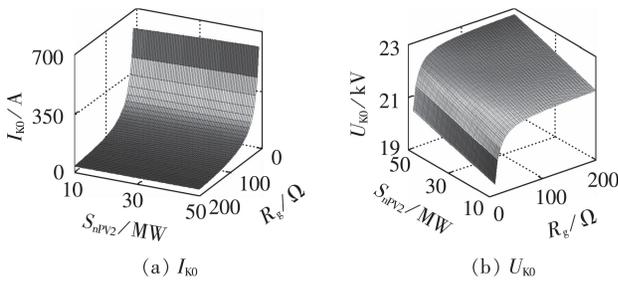
(2)场景2下, PV 的输出特性如图5所示。

由图5可知, PV_1 的功率损耗增大必然导致其输出电流减小,而伴随着系统总的光伏接入容量减小, PV_2 势必需要输出更大的电流以支撑电网电压。

图5 光伏输出电流随功率损耗和 R_g 的变化特性Fig.5 Variation characteristics of PV output current varying with power loss and R_g

2.3.2 零序电流、电压故障特性

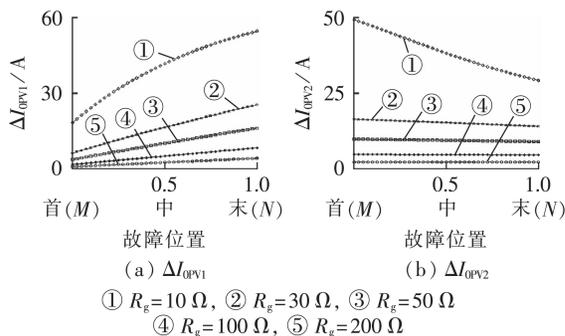
(1)场景1下,故障点的零序电流 I_{K0} 和零序电压 U_{K0} 的故障变化特性如图6所示。

图6 零序电流电压随 S_{nPV2} 和 R_g 的变化特性Fig.6 Characteristics of zero-sequence current and voltage varying with S_{nPV2} and R_g

I_{K0} 和 U_{K0} 主要受 R_g 变化的影响:当 $R_g \in [10, 50] \Omega$ 时,随着 R_g 的增大, I_{K0} 迅速减小而 U_{K0} 迅速增大;当 $R_g \in [50, 200] \Omega$ 时, I_{K0} 和 U_{K0} 的变化趋势不变,但速度减缓。

在相同的 R_g 下,光伏接入容量的增加使得 I_{K0} 和 U_{K0} 增加,表明了光伏源对零序电流的助增作用。

(2)场景3下, PV_1 、 PV_2 对零序电流的助增量随故障点 K 移动的变化特性曲线如图7所示。图中,横轴刻度值表示 K 、 M 之间的距离与线路 MN 全长的比值。

图7 故障位置和 R_g 变化下的光伏助增零序电流Fig.7 PV-assisted zero-sequence current under different fault locations and values of R_g

当故障点由 M 向 N 移动,即故障点 K 逐渐远离

PV_2 (接入母线 M)而接近 PV_1 (接入母线 N)时,在其他条件不变的情况下,必然有 I_{PV1} 增加而 I_{PV2} 下降,因此 PV_1 对零序电流的助增量增加而 PV_2 对零序电流的助增量减小。

由式(10)可知, PV_1 和 PV_2 的等效电压源分别为 $E_{PV1} = (Z_{S35} + Z_{MK})I_{PV1}$ 和 $E_{PV2} = Z_{S35}I_{PV2}$,点 K 远离 M 导致 Z_{MK} 增加,而 Z_{S35} 不变,因此,由故障点移动导致 PV_1 的助增量变化大于 PV_2 的助增量变化是 PV_1 的零序电流助增曲线斜率大于 PV_2 的零序电流助增曲线斜率的原因。

3 零序保护性能分析

3.1 保护配合关系

如图1所示,光伏电站的每条集电线出口处都设有保护(PVS_1 设保护1, PVS_2 设保护3),作为末端线路的集电线的保护无需考虑配合关系。

PVS_1 经联络线 MN 接入升压变 T_1 ,由于母线 N 不带就地负荷,故联络线的光伏侧无需配置保护,仅在系统侧设保护2。

PVS_1 的保护2需要和保护1配合实现选择性:当集电线发生故障时,应由保护1切除故障线路,保护2不动,非故障集电线可继续送电;当联络线发生故障时,由保护2动作,将 PVS_1 整体全部切除。

3.2 光伏助增及中性点电阻对保护性能的影响

为了更好地说明光伏助增和中性点电阻对保护性能的影响,表1给出了场景3下,不计光伏(短路计算只考虑系统电源而将PV源视为负载)和计及光伏

表1 计及光伏和不计光伏时的不同故障位置的零序电流

Table 1 Zero-sequence current at different fault locations with and without PV

是否计及光伏	R_g/Ω	零序电流/A			
		故障点在 M 端(首)	故障点在 MN 中点(中)	故障点在 N 端(末)	
否	10	650.56	502.58	386.29	
	15	439.46	374.30	312.44	
	16	412.63	355.65	300.36	
	20	331.59	295.93	259.16	
	25	266.18	243.96	220.14	
	30	222.30	207.23	190.75	
	50	133.94	128.84	123.19	
	100	67.17	65.97	64.67	
	130	51.70	51.00	50.26	
	140	48.02	47.42	46.78	
	200	33.63	33.34	33.04	
	是	10	715.68	580.11	467.80
		15	483.07	431.21	377.27
16		459.53	411.62	356.51	
18		404.09	369.06	330.79	
20		364.35	340.56	312.33	
30		244.17	238.22	229.36	
50		147.07	147.97	148.83	
100		73.74	75.72	77.50	
200		36.92	38.26	39.56	

的零序电流仿真结果。

由表 1 数据可得以下 3 条规律。

规律 1: 场景 3 的所有条件下, 不计光伏时的零序电流 $|I_{K0}^{\text{noPV}}|$ 均比计及光伏时的零序电流 $|I_{K0}|$ 小, 这也印证了关于光伏电流源对零序电流助增的分析。

规律 2: 线路 MN 首、末端故障时的零序电流之差有 $|I_{K0,M}^{\text{noPV}}| - |I_{K0,N}^{\text{noPV}}| > |I_{K0,M}| - |I_{K0,N}|$, 与图 7 的分析结果吻合, 即故障点由 M 往 N 移动, PV_1 助增量的增加大于 PV_2 助增量的减少, 总的光伏助增量有 $|\Delta I_{K0,M}| < |\Delta I_{K0,N}|$, 说明光伏源对零序电流的助增量具有非线性。

规律 3: 不计光伏时, 有 $|I_{K0,M}^{\text{noPV}}| > |I_{K0,m}^{\text{noPV}}| > |I_{K0,N}^{\text{noPV}}|$, 这是因为在其他条件不变的情况下, 当故障点由 M 往 N 移动时, $Z_{\Sigma 2}$ 增大必然导致 $|I_{K0}^{\text{noPV}}|$ 减小。计及光伏时, 当 $R_g < 50 \Omega$ 时也有类似规律, 但当 $R_g \geq 50 \Omega$ 时, 则有 $|I_{K0,M}| < |I_{K0,m}| < |I_{K0,N}|$ 。

下面讨论上述 3 条规律对保护性能的影响。

3.2.1 光伏助增对保护性能的影响

设联络线保护 2 的零序电流瞬时速断定值按躲开集电线路出口处(母线 N)可能出现的最大零序电流(单相接地故障)整定, 可靠系数取为 1.2。

规律 1 如果不计光伏, 以 $R_g = 10 \Omega$ 为例, 保护 2 的零序 I 段定值 $I'_{\text{op},2} = 1.2 \times 3 |I_{K0,N}^{\text{noPV}}| = 1391 \text{ (A)}$, 但实际有光伏接入的母线 N 在发生单相接地故障时的最大零序电流达到了 1403 A, 超过保护定值。这说明在保护整定计算中, 如果不考虑光伏助增效应, 保护将可能误动, 失去选择性。

规律 2 如果忽略光伏助增量的非线性, 则认为在相同的 R_g 下, $|\Delta I_{K0}|$ 是定值, 那么无论 $|\Delta I_{K0}|$ 取何定值, 即使是以精确的 $|\Delta I_{K0,M}|$ 或 $|\Delta I_{K0,N}|$ 作为全线路故障的助增量, 都导致保护判断错误。

下面以 $R_g = 20 \Omega$ 为例进行分析, 其中 $|I_{K0}^{\text{noPV}}|$ 易通过计算获得。

(1) 设 $|\Delta I_{K0,M}| \approx 33 \text{ A}$ 为全线路的助增量, 则保护 2 的零序 I 段定值 $I'_{\text{op},2} = 1.2 \times 3 (|I_{K0,N}^{\text{noPV}}| + |\Delta I_{K0,N}|) \approx 1051 \text{ (A)}$, 实际可靠系数 $K'_{\text{rel},2} = 1051 / (3 |I_{K0,N}|) \approx 1.12$, 因此可能因可靠系数不足导致保护失去选择性。

(2) 设 $|\Delta I_{K0,N}| \approx 53 \text{ A}$ 为全线路的助增量, 则保护 2 的零序 I 段定值 $I'_{\text{op},2} = 1.2 \times 3 (|I_{K0,N}^{\text{noPV}}| + |\Delta I_{K0,N}|) \approx 1124 \text{ (A)}$, 但是实际上 $3 |I_{K0,M}| = 1093 \text{ (A)} < 1124 \text{ A}$, 即由于光伏助增的非线性, 母线 M 处没有灵敏性。

上述分析说明, 由于光伏源对零序电流的非线

性助增, 如果要在联络线保护 2 处设零序电流瞬时速断保护, 并且要同时保证选择性和灵敏性, 在所给算例条件下, 中性点电阻 R_g 只能取 $10 \sim 18 \Omega$, 再结合 2.3 节中兼顾一次系统安全的取值范围, R_g 只能取为 $15 \sim 18 \Omega$ 。

3.2.2 光伏电流 I_{PV} 及中性点电阻 R_g 的匹配关系对保护性能的影响

规律 3 说明光伏电流源 I_{PV} 及中性点电阻 R_g 的匹配关系对零序电流特性有影响, 为便于分析说明, 将 $Z_{\Sigma 2}$ 和 $Z_{\Sigma 0}$ 代入式(9)得:

$$I_{K0} = \frac{E_s + (Z_{MK} + Z_{S35})I_{PV1} + Z_{S35}I_{PV2}}{2(Z_{S35} + Z_{MK}) + (Z_{Tg} + 3R_g + 3Z_{MK})} \quad (11)$$

当故障点 K 在 MN 上移动时, 式(11)中仅有 Z_{MK} 和 I_{PVi} 变化, 先假定 I_{PVi} 不变。点 K 位于线路 MN 的首端、中点和末端时, 对应的 Z_{MK} 分别为 $Z_{MK,M} = 0$ 、 $Z_{MK,m} = 0.5Z_{MN}$ 、 $Z_{MK,N} = Z_{MN}$, 代入式(11)可得:

$$\begin{cases} I_{K0,M} = \frac{E}{Z + 3R_g} \\ I_{K0,m} = \frac{E + 0.5Z_{MN}I_{PV1}}{Z + 3R_g + 0.5Z_{MN} \times 5} \\ I_{K0,N} = \frac{E + Z_{MN}I_{PV1}}{Z + 3R_g + 5Z_{MN}} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $E = E_s + Z_{S35}(I_{PV1} + I_{PV2})$; $Z = 2Z_{S35} + Z_{Tg}$ 。观察式(12)可知, 不同故障位置的 I_{K0} 之间的大小关系受

$A = \left| \frac{E}{Z + 3R_g} \right|$ 和 $B = \left| \frac{I_{PV1}}{5} \right|$ 的相对大小决定。

(1) 当 R_g 取值较小时, 有 $A > B$, 则零序电流关系为 $|I_{K0,M}| > |I_{K0,m}| > |I_{K0,N}|$;

(2) 当 R_g 逐渐增大到满足 $A = B$ 时, 则零序电流关系为 $|I_{K0,M}| = |I_{K0,m}| = |I_{K0,N}|$;

(3) 当 R_g 取值较大时, 有 $A < B$, 则零序电流关系为 $|I_{K0,M}| < |I_{K0,m}| < |I_{K0,N}|$ 。

再考虑 I_{PVi} 变化的因素, 由本节对规律 2 的分析可知, 故障点 K 由 M 往 N 移动时, I_{PVi} 的变化使得总的光伏助增量增大, 即 $|\Delta I_{K0,M}| < |\Delta I_{K0,m}| < |\Delta I_{K0,N}|$, 因此会进一步促使 $|I_{K0,M}| < |I_{K0,m}| < |I_{K0,N}|$ 。

上述分析说明, 光伏电流 I_{PV} 及中性点电阻 R_g 的匹配关系与零序电流特性密切相关, 当 $A < B$ 时, 集电线路出口处的单相接地零序电流大于联络线上单相接地的零序电流。在这种情况下, 保护 2 将不能通过电流定值而只能通过增加动作时限实现选择性, 因此保护 2 不能再设置零序电流瞬时速断保护。

4 零序保护整定及电阻选取算例

本节以图 1 所示的并网光伏电站为例, 作馈线

零序电流保护算例整定,参数与2.3节一致。

对于有联络线路的PVS₁,需要考虑联络线保护2和集电线保护1的配合关系。根据工程需求,保护2可以配置零序电流瞬时速断保护,也可不配置零序电流瞬时速断保护而只配置零序过电流保护。下面分别讨论2种配置情况对保护整定和中性点电阻R_g选择的影响。

4.1 联络线保护配零序电流瞬时速断

3.2.1节已经讨论过,当联络线保护2配置瞬时速断时,要同时保证选择性和灵敏性,则R_g只能取15~18Ω,以R_g=16Ω为例做后续计算。

(1)有联络线的PVS₁保护整定。

a. 保护2零序电流I段保护(瞬时速断保护)。

按躲开集电线出口处(母线N)可能出现的最大零序电流(光伏电流源无功功率损耗)整定,可靠系数K'_{rel,2}=1.2, I'_{op,2}=1.2×3|I_{K0,N}^{noPV}|≈1283(A),保护范围为线路全长的36.3%。由于I段保护范围有限,加设过电流II段保护。

b. 保护2零序电流II段保护(过电流保护)。

按躲过本回联络线路下级全部集电线路的电容电流之和I_{C,PVS1}整定,可靠系数K''_{rel,2}取为2.5^[14], I''_{op,2}=2.5×2×5×2.81≈70(A),保护2的零序II段动作时限比保护1的零序I段高出1个Δt。以最小零序电流(光伏功率损耗100%,即无光伏助增)作灵敏度检验:K''_{sen,2}=3|I_{K0,N}^{noPV}|/I''_{op,2}≈13,满足要求。

c. 保护1零序过电流保护。

按躲过本回集电线的对地电容电流整定,可靠系数K'_{rel,1}取为2.5, I'_{op,1}=2.5×5×2.81≈35(A)。

以本回集电线可能出现的最小零序电流校验灵敏度,显然此最小零序电流I_{JD,min}^{PVS1}出现在集电线路末端单相接地,且无光伏助增时,易知:

$$I_{JD,min}^{PVS1} = E_s / (2Z_{\Sigma 2}^{PVS1} + Z_{\Sigma 0}^{PVS1}) \quad (13)$$

其中, Z_{Σ2}^{PVS1}=Z_{S35}+Z_{MN}+Z_{JD},为负序综合阻抗, Z_{Σ0}^{PVS1}=Z_{Tg}+3R_g+3Z_{MN}+3Z_{JD},为零序综合阻抗, Z_{JD}为集电线阻抗。代入各参数得|I_{JD,min}^{PVS1}|≈285A,则灵敏度K'_{sen,1}=3|I_{JD,min}^{PVS1}|/I'_{op,1}≈24,满足要求。

(2)无联络线的PVS₂保护整定。

保护3零序过电流保护按躲过本回集电线的对地电容电流整定,可靠系数K'_{rel,3}取为2.5, I'_{op,3}=2.5×5×2.81≈35(A)。

以本回集电线可能出现的最小零序电流校验灵敏度,此最小零序电流I_{JD,min}^{PVS2}为:

$$I_{JD,min}^{PVS2} = E_s / (2Z_{\Sigma 2}^{PVS2} + Z_{\Sigma 0}^{PVS2}) \quad (14)$$

其中, Z_{Σ2}^{PVS2}=Z_{S35}+Z_{JD},为负序综合阻抗; Z_{Σ0}^{PVS2}=Z_{Tg}+3R_g+3Z_{JD},为零序综合阻抗。可得|I_{JD,min}^{PVS2}|≈388A,灵敏度K'_{sen,3}=3|I_{JD,min}^{PVS2}|/I'_{op,3}≈33,满足要求。

4.2 联络线保护不配零序电流瞬时速断

在联络线不配瞬时速断时,R_g的取值未定,下面结合保护整定和选择性和灵敏性分析确定。

(1)有联络线的PVS₁保护整定。

a. 保护2零序过电流保护。

按躲过本回联络线路下级全部集电线路的电容电流之和I_{C,PVS1}整定,可靠系数K'_{rel,2}取为2.5。有I'_{op,2}=2.5×2×5×2.81=70.25(A),此时不能由电流定值保证选择性,所以动作时限应比保护1高出1个Δt。

同样以最小零序电流(无光伏助增)作灵敏度检验,此时R_g未定,要满足K'_{sen,2}=3|I_{K0,N}^{noPV}|/I'_{op,2}≥2,即3|I_{K0,N}^{noPV}|≥140.5A,由表1数据可知R_g≤130Ω。

b. 保护1零序过电流保护。

按躲过本回集电线的对地电容电流整定,可靠系数K'_{rel,1}取为2.5, I'_{op,1}=2.5×5×2.81≈35(A)。

以本回集电线可能出现的最小零序电流校验灵敏度,取R_g=130Ω,此时|I_{JD,min}^{PVS1}|≈50A,灵敏度K'_{sen,1}=3|I_{JD,min}^{PVS1}|/I'_{op,1}≈4,满足要求。

(2)无联络线的PVS₂保护整定。

保护3零序过电流保护按躲过本回集电线的对地电容电流整定,可靠系数K'_{rel,3}取2.5, I'_{op,3}=2.5×5×2.81≈35(A)。

以本回集电线可能出现的最小零序电流来校验灵敏度,取R_g=130Ω,此时|I_{JD,min}^{PVS2}|≈51A,灵敏度K'_{sen,3}=3|I_{JD,min}^{PVS2}|/I'_{op,3}≈4,满足要求。

以上给出了2种保护配置下的定值整定和选择性、灵敏性分析,不同的配置有不同的保护性能要求,会导致不同的电阻选择范围。

本节所得的电阻选择范围都是在前述一次系统安全基础上做出的修正,因此是兼顾一次系统安全和二次保护性能的中性点接地电阻选择范围。

5 结论

本文提出了一种集中式并网光伏电站中性点接地电阻的选择方法。沿用了现有原则,从限制弧光过电压,减小通信干扰和保障人身安全3个方面得到了保证一次安全的电阻选取范围。通过分析含光伏源的配网接地故障得出光伏源对零序电流的非线性助增特性,再结合保护的选择性和灵敏性要求,对一次安全的电阻选取范围做出修正,得到了兼顾一次系统安全和二次保护性能的中性点接地电阻取值。最后通过实际工程算例,给出了详细的电阻选择及保护整定和灵敏度校验方案,验证了所提方法的正确性和可行性,对后续工程应用有一定的指导意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家电网公司. 光伏发电站接入电网技术规定: Q/GDW 1617—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 唐艳波. 变电站 35 kV 系统小电阻接地方案研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(5): 99-101.
TANG Yanbo. Study on grounding via small resistance of 35 kV system in substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(5): 99-101.
- [3] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [4] 吴争荣, 王钢, 李海峰, 等. 计及逆变型分布式电源控制特性的配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 92-96.
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Fault characteristics analysis of distribution networks considering control scheme of inverter interfaced distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 92-96.
- [5] 吴争荣, 王钢, 李海峰, 等. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 130-136.
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136.
- [6] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Method of fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [7] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [8] 谭会征, 李永丽, 陈晓龙, 等. 带低电压穿越特性的逆变型分布式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 31-37.
TAN Huizheng, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Reactive voltage control partitioning based on power network pilot node identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 31-37.
- [9] 郭丽伟, 薛永瑞, 张林利, 等. 含分布式电源的小电阻接地方式配电网单相接地故障分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 116-123.
GUO Liwei, XUE Yongrui, ZHANG Linli, et al. Analysis of single phase earth fault in low resistance grounded distribution network containing DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 116-123.
- [10] 吴兴全, 吴丽, 李召兄, 等. 电阻接地的并网光伏电站零序电流工程实用算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 120-126.
WU Xingquan, WU Li, LI Zhaoxiong, et al. An engineering calculation method for zero-sequence current of grid-connected photovoltaic station with neutral grounding resistance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 120-126.
- [11] 杨伟涛, 曾德辉, 汪隆君, 等. 逆变型分布式电源接入对小电阻接地系统馈线零序电流保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 162-168.
YANG Weitao, ZENG Dehui, WANG Longjun, et al. Influence of inverter interfaced distributed generators on zero-sequence current protection for feeder of low resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 162-168.
- [12] 贾科, 汪执雅, 戴明, 等. 分布式光伏接入对 110 kV 主变中性点电压的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 181-186.
JIA Ke, WANG Zhiya, DAI Ming, et al. Influence of distributed PV integration on neutral point voltage of 110 kV main transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 181-186.
- [13] 刘明岩. 配电网中性点接地方式选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-89.
LIU Mingyan. Selection of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 86-89.
- [14] 付晓奇, 徐粮珍, 赵宝丽. 10 kV 配网中性点小电阻接地技术与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 227-230.
FU Xiaoqi, XU Liangzhen, ZHAO Baoli. Discussion on the technology and application of 10 kV distribution network neutral grounding through small resistance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 227-230.
- [15] 刘渝根, 王建南, 米宏伟, 等. 10 kV 配电网中性点接地方式的优化研究[J]. 高压技术, 2015, 41(10): 3355-3362.
LIU Yugen, WANG Jiannan, MI Hongwei, et al. Optimization research on neutral grounding mode of 10 kV distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3355-3362.
- [16] 李朝晖, 段绍辉, 郑志铿. 中性点小电阻接地配电网单相接地故障人身安全性试验研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(9): 40-42.
LI Zhaohui, DUAN Shaohui, ZHENG Zhikeng. Research on human safety test under single phase grounding fault of distribution network with neutral point resistor grounding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9): 40-42.
- [17] WANG Qianggang, ZHOU Niancheng, YE Ling. Fault analysis for distribution networks with current-controlled three-phase inverter interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1532-1542.
- [18] FATIH B, GAMZE E, HAKAN O. Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 164: 58-69.

作者简介:



李 政

李 政(1981—), 男, 四川隆昌人, 博士研究生, 通信作者, 主要研究方向为新能源并网保护与控制(E-mail: lz15823020513@163.com);

卢继平(1960—), 男, 北京人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: lujiping@cqu.edu.cn);

刘加林(1992—), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要研究方向为新能源并网的稳定与控制(E-mail: liujialin@cqu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

(下转第 147 页 continued on page 147)

Distributed state estimation of multi-area power systems based on consensus algorithm

XIA Shiwei¹,ZHANG Qian¹,YU Jing²,LI Gengyin¹,CHEN Bing³,WU Haiwei²

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;
3. State Grid Zhenjiang Power Supply Company, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Along with the continuous increasing of power grid scale, the traditional centralized state estimation methods face heavy task of data communication and large computation amount, which is difficult to satisfy the requirements of current power system state estimation. Power system is divided into several non-overlapping subsystems considering the nonlinearity of power system state estimation, and Lagrange multiplier method is used for decoupling the state estimation equation into a multi-area nonlinear state estimation model of power system. A fully distributed state estimation method is proposed based on consensus theory. The method does not need state estimation control center but only needs each subsystem to exchange the consensus variables and the state variables of boundary nodes, and each subsystem can independently calculate the estimation values of local state variables in parallel, thus the communication and computational burden is balanced compared with the centralized state estimation. Simulative results of IEEE 14-bus system verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: electric power systems; multi-area; distributed state estimation; consensus theory

(上接第 55 页 continued from page 55)

Neutral grounding resistance selection and zero-sequence protection for grid connected photovoltaic power station

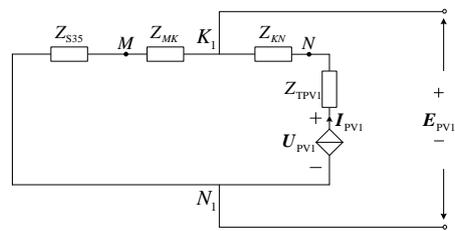
LI Zheng¹, LU Jiping¹, LIU Jialin¹, HE Qian²

- (1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401120, China)

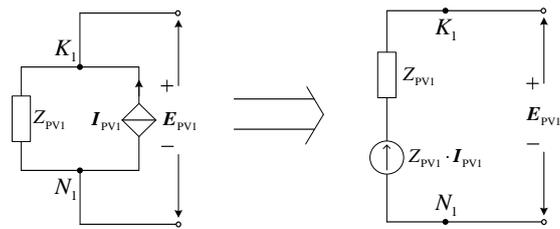
Abstract: Under the premise of ensuring the safety of person and equipment, based on the analysis of the variation characteristics of zero-sequence current with neutral grounding resistance, and combining with the selectivity and sensitivity requirements of zero-sequence protection of all levels of lines in the station, a method for selecting neutral grounding resistance considering the nonlinear boosting of the photovoltaic source and the performance of protection action is proposed. For different configurations of protection, the proposed method can obtain the resistor value considering both primary system security and secondary protection performance. Through the actual engineering examples, the detailed resistor selection and protection setting schemes are given, and the correctness and feasibility of the proposed method are verified.

Key words: photovoltaic power station; neutral grounding resistance; zero-sequence current characteristics; nonlinear boosting of photovoltaic source; relay protection; protection action performance

附录 A



(a) I_{PV1} 独立作用



(b) I_{PV1} 等效电源

图 A1 光伏电流源独立等效

Fig. A1 Integrated power supply equivalent

附录 B

算例中负荷设定为空载，网络参数如下：

- (1) 系统参数：110 kV系统短路容量为3000 MV·A。
- (2) 线路参数：所有线路正负序单位参数相同，零序单位参数为正、负序单位参数的3倍；35kV线路MN长度为10 km，型号为LGJ-240，正、负序阻抗均为 $0.132+j0.386 \Omega/\text{km}$ 。
- (3) 变压器参数： T_1 的阻抗电压 $U_{KT1}=10.75\%$ ，光伏并网变压器的阻抗电压 $U_{KTPV}=6\%$ 。
- (4) 光伏站PVS1容量为20MW，由2回集电线组成，PVS2容量为50MW，共有5回集电线。
- (5) 集电线全部采用电缆，每回集电线电缆总长度为5 km，型号为YJV22-3×95mm，正、负序阻抗均为 $0.196+j0.129 \Omega/\text{km}$ 。