110 kV电阻接地系统接地保护特殊问题的研究

在配电网的改造中，若110 kV系统采用中性点经电阻接地的方式，就能消除或抑制最常见的单相接地故障在负荷侧引起的电压暂降/暂升，明显提高配电网的供电质量。但由于中性点电阻值远大于系统的零序电抗，致使零序阻抗角发生很大的改变，导致零序方向元件的动作特性不同于中性点直接接地系统。同时中性点接地方式的改变对相邻电压等级接地保护的影响也必须研究。从理论上分析了上述问题，提出了110 kV中性点经电阻接地系统的零序方向元件动作条件以及相关问题的解决方案，并用ATP－EMTP数值仿真验证了结果。

刘　飞　吕艳萍　王慎杰／武汉大学电气工程学院
邵金良　李　俊／湖北黄石供电公司

刘　飞／硕士研究生

关键词/Keywords
中性点经电阻接地·
零序方向元件·
最大灵敏角·
零序电流保护·

110 kV配电网采用中性点经电阻接地方式，能消除和抑制单相接地故障时负荷侧的电压暂降/暂升，明显提高配电网的供电质量[1-2]。然而中性点接地方式的改变是一个综合性、系统性的问题，它不仅直接影响到系统的过电压程度、设备绝缘水平，还会影响到继电保护的配置和整定。文献[3]及有关研究和试验表明，采用适当的设备选型及改造措施，国产110 kV电气设备能够满足中性点经电阻接地系统的绝缘水平要求；文献[4]研究了中性点经电阻接地系统的零序电压电流大小及分布规律、以及110 kV电阻接地系统的接地保护配置原则和整定计算方法，但未讨论中性点接地电阻对零序方向元件的影响。尤其对于110 kV系统中性点由直接接地改变为经电阻接地后，对原有的高压侧（如220 kV侧）、低压侧（38.5 kV或10.5 kV侧）继电保护定值有何影响，是否需要重新计算等问题缺乏深入研究，而这些问题直接关系到改造后的系统能否安全可靠运行。本文在前述研究的基础上，根据电阻接地系统的特点，深入研究了110 kV中性点经电阻接地系统的零序方向元件动作特性；分析讨论了接地短路分别发生在220 kV侧、110 kV侧时对各侧系统接地保护的影响，提出了对应的措施，并采用ATP－EMTP仿真软件[5]进行了验证。

湖北省电力公司重点科技项目（5215B014003H）。

中性点经电阻接地系统的零序方向元件

110 kV系统采用中性点经电阻接地方式时，按照消除和抑制单相接地故障电压跌落的约束条件，即

$$R_N \geqslant 11X_1N/3 \qquad (1)$$

式中，R_N为单个中性点的接地电阻值；N为系统接地电阻的个数；X_1为110 kV系统的最大等效正序电抗。

选择的接地电阻值一般会远大于系统的零序电抗，从而使系统的零序电抗与零序电阻参数之比发生很大变化，导致系统的零序电压、电流的大小和分布以及它们之间的相位差不同于中性点直接接地系统。

1. 零序电压电流的大小与分布及其相位差

110 kV中性点经电阻接地系统发生接地短路时，与故障点有直接电气联系的母线和中性点上都会出现零序电压。如图1所示，当f_1点发生金属性单相接地

中国知网　https://www.cnki.net

故障时，其零序电压的大小和分布如图1所示：故障点处的零序电压$U_{f_0}\approx U_p$（正常相电压），由于一般系统的零序阻抗远小于中性点的接地电阻R_N，因此零序电压主要降落在110 kV中性点上，即中性点电压$\dot{U}_{R_1}\approx\dot{U}_{R_2}\approx\dot{U}_{f_0}$，线路保护安装处的零序测量电压$\dot{U}_{01}$、$\dot{U}_{02}$也与故障点处的零序电压近似相等，其参考正方向为母线指向大地。

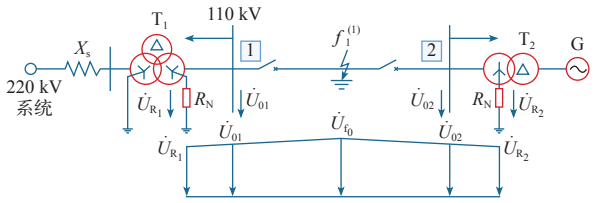

图1　中性点经电阻接地系统的零序电压大小与分布

在中性点经电阻接地系统发生接地故障时，故障点的零序电压源将通过大地和中性点接地电阻以及与故障点有直接电气联系的线路、变压器构成零序电流的回路。图1系统中线路f_1处发生单相接地故障时，对应的零序等值电路如图2所示[6-7]。

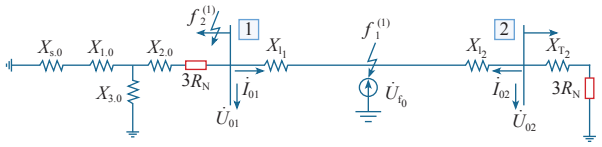

图2　中性点经电阻接地系统的零序电流分布

图2中，$X_{s.0}$为220 kV系统等效零序电抗；$X_{1.0}$、$X_{2.0}$和$X_{3.0}$分别为降压变压器T_1的高、中和低压侧绕组漏抗；X_{l_1}、X_{l_2}分别为故障点f_1至两端保护安装处的线路零序电抗；X_{T_2}为升压变压器T_2的零序等效电抗；$3R_N$为变压器110 kV侧中性点的零序等效电阻。

设零序电流的正方向为从保护安装处的母线指向被保护的线路，当本线路内部f_1处发生单相接地故障时，按所规定的零序电压、电流参考正方向，流过保护1处的零序电流为

$$-\dot{I}_{01}=\frac{\dot{U}_{01}}{3R_N+\mathrm{j}[(X_{s.0}+X_{1.0})//X_{3.0}+X_{2.0}]}\approx\frac{\dot{U}_{01}}{3R_N}\qquad(2)$$

由于根据防止电压跌落以及过电压要求选择的中性点等效接地电阻值$3R_N$远大于线路和变压器的零序等效电抗，所以中性点经电阻接地系统的零序阻抗角$\varphi\approx0$，$\dot{U}_{01}$与$\dot{I}_{01}$的相位关系如图3所示。并且由于受到中性点接地电阻的限制，其零序电流值要比中性点直接接地系统小得多。

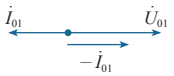

图3　正方向故障零序电压、电流相量图

同理分析保护2处的$\dot{U}_{02}$和$\dot{I}_{02}$，也可得出相同结论，即在中性点经电阻接地系统中，保护的正方向发生接地故障时，保护安装处的零序电压与零序电流的相位差角约为180°。

当在图2中f_2处发生接地故障时，对于保护1而言是反方向故障，这时流过保护1的零序电流为

$$\dot{I}_{01}=\frac{\dot{U}_{01}}{3R_N+\mathrm{j}(X_{l_1}+X_{l_2}+X_{T_2})}\approx\frac{\dot{U}_{01}}{3R_N}\qquad(3)$$

同样，由于$3R_N$远大于T_2和线路的等效电抗，因此反向故障时，保护安装处的零序电压与零序电流相位差角近似为0°，即差不多同相位。

2. 经电阻接地系统的零序方向元件动作特性

零序方向元件应保证正向接地故障时可靠动作，反向接地故障时可靠不动作，根据上述讨论结论，中性点经电阻接地系统的零序方向元件最大灵敏角$\varphi_{l_m}\approx180°$。考虑系统各种因素的影响（如电压、电流互感器角误差，系统中电抗参数的影响等），区内故障时$\dot{U}_0$与$\dot{I}_0$不一定正好反相，区外故障时也不一定正好同相，为保证正向故障时零序方向元件能可靠动作，在最大灵敏角基础上±90°，即动作判据为

$$90°=180°-90°<\arg\frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0}<180°+90°=270°\qquad(4)$$

其动作特性如图4所示。

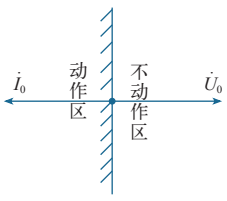

图4　中性点经电阻接地系统零序方向元件动作特性

图4中，左半平面阴影部分为中性点经电阻接地系统零序方向元件的动作区，右半平面为不动

中国知网 https://www.cnki.net

作区。

而在中性点直接接地系统中，用于110 kV线路保护装置的线路阻抗角一般设为65°左右， 零序方向元件的最大灵敏角为245°(180°+65°)，其动作特性如图5所示。

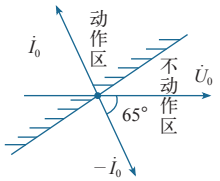

图5　中性点直接接地系统的零序方向元件动作特性

其动作判据为

$$155° < \arg\frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} < 335° \qquad (5)$$

若将这种零序方向元件直接用于中性点经电阻接地系统，则正向故障时可能发生拒动，反向故障时可能发生误动，如图6所示。

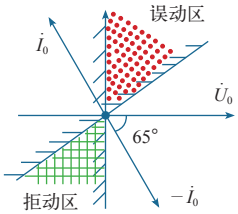

图6　零序方向元件的误动区和拒动区

3. 仿真验证

现以图1的系统为例，在ATP－EMTP中建立仿真模型，对中性点经电阻接地系统的零序方向元件动作判据式（4）进行验证。

图1中各元件参数如下。220 kV系统等效电抗 $X^*_{s.1}=0.047\ 3$；降压变压器T_1：$S_1=180$ MV·A，YNynd11，电压比为220/121/10.5 kV，$U_{d_{1-2}}=13.42\%$，$U_{d_{1-3}}=23.57\%$，$U_{d_{2-3}}=7.82\%$；发电机G：$P=25$ MW，$U_N=10.5$ kV，$\cos\varphi=0.85$，$X_d=12.6\%$；升压变压器T_2：$S_N=31.5$ MV·A，D/Y_N，电压比为10.5/121 kV，$U_d=10.5\%$；线路：LGJ－240/26 km，$r_1=0.118\ 1\ \Omega$/km，$l_1=1.245$ mH/km，$r_0=0.288\ 1\ \Omega$/km，$l_0=2.49$ mH/km。根据接地电阻的选择约束条件$R_N \geqslant 11X_1N/3$计算所得，两侧110 kV侧中性点分别经160 Ω电阻接地。

设在图1中f_1处发生A相接地故障，对于线路保护1和保护2而言是正方向故障，仿真所得保护安装处的三相电压与电流、零序电压和零序电流以及它们之间的相位差如表1所示。

表1　线路内部和外部故障时的仿真结果

测量值	f_1处A相接地		f_2处A相接地	
kV/A	保护1处	保护2处	保护1处	保护2处
$\dot{U}_A$	9.9∠153.4°	4.5∠150.4°	0	8∠151°
$\dot{U}_B$	104∠−67.2°	102∠−69.2°	112∠−64.2°	103∠−69.3°
$\dot{U}_C$	120∠−129.5°	116∠−131.5°	119∠−125°	117∠−131°
$\dot{I}_A$	800∠71.3°	51∠−89.1°	70∠−83.7°	70∠−100.1°
$\dot{I}_B$	269∠−68.5°	271∠109.5°	274∠−71.0°	277∠107.1°
$\dot{I}_C$	288∠−154.2°	291∠23.81°	299∠−153.3°	303∠24.7°
$3\dot{U}_0$	190∠256.3°	185∠256.1°	199∠264.4°	187∠255.4°
$3\dot{I}_0$	395∠75.9°	367∠61.2°	367∠242.2°	371∠60.6°
$\dot{U}_0\dot{I}_0$	180.4°	194.9°	22.2°	194.8°

图2中，设在相邻线路的f_2处发生A相接地短路，对于线路保护1而言，故障点位于保护的反方向。仿真所得的保护1、保护2安装处的有关电气测量值也记入表1中。

由表1中的仿真结果可以看出，线路内部故障（f_1处短路）时，线路两侧保护1、保护2的零序电压与零序电流之间的夹角分别为180.4°和194.9°，均满足式（3）的动作条件，零序方向元件可靠动作。而在本线路的外部f_2处发生接地短路时，保护装置1的$\dot{U}_0$与$\dot{I}_0$间的夹角为22.2°，零序方向元件可靠不动作。值得指出的是，这种情况下保护2处的零序方向元件仍判断为正向故障（$\dot{U}_0$与$\dot{I}_0$间的夹角为194.8°），它会起动，这时应由保护装置的时限或电压电流整定值来保证保护动作的选择性。

由此可见，在将110 kV中性点直接接地系统改造为中性点经电阻接地系统时，为了保证零序方向元件动作的正确性，应将原系统保护装置零序方向元件的最大灵敏角调整为180°。

中性点改经电阻接地对其他侧保护的影响

110 kV侧中性点改经电阻接地后，对系统的正序、负序网络结构和参数都没有影响，因此不会影响到原系统相间短路保护的正确动作，但由于

中国知网　https://www.cnki.net

零序网络和参数的改变，可能会对系统的接地保护产生影响。中性点改经电阻接地后对本电压等级接地保护的影响以及对应的整定计算方法已在文献[4]中讨论，在此主要研究接地方式的改变对其他电压等级接地保护的影响。

以最常见的220 kV降压变电站接线方式为例进行讨论，如图7所示。两台220/110/10.5 kV主变压器并列运行，T_1主变压器220 kV侧中性点直接接地、110 kV侧中性点经电阻R_N接地；T_2主变压器两侧中性点均不接地。

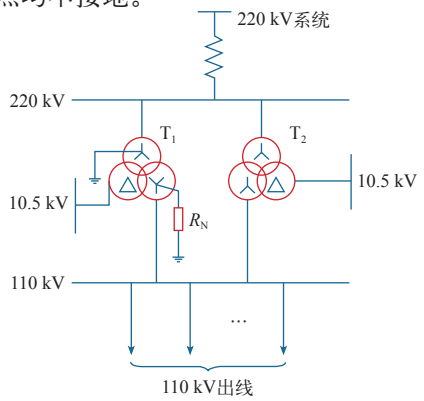

图7　典型的220 kV降压变电站接线方式

首先研究110 kV中性点变为经电阻接地后对220 kV侧接地保护的影响，分两种情形进行讨论。

1. 110 kV系统仅主电源侧中性点经电阻接地

从图7中可以看出，110 kV系统中仅有主电源侧中性点经电阻R_N接地，当系统220 kV侧发生单相接地短路时，系统的正序、负序等效电路与中性点直接接地时相同，而零序等效网络如图8所示。

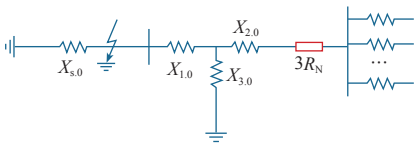

图8　单侧经电阻接地时的零序等效电路

对于220 kV侧的接地故障点而言，零序组合电抗$X_{\Sigma 0}$为

$$X_{\Sigma 0}=(X_{1.0}+X_{3.0})X_{s.0} \tag{6}$$

其值与R_N无关，与中性点直接接地时相同。由于系统的正序电抗$X_{\Sigma 1}$、负序电抗$X_{\Sigma 2}$亦都未改变，所以接地故障点的总$\dot{I}_0$应与中性点直接接地时相同。由图8的零序等效网络可以看出，接有R_N的支路并不会参与分流，即有无$3R_N$对220 kV侧故障零序分流系数不造成影响。因此，220 kV侧各支路的零序电流，应与110 kV侧中性点直接接地时在该点发生单相接地故障时相同，所以原系统的220 kV接地保护不必重新整定计算。

2. 110 kV系统有多个中性点经电阻接地

若在多电源供电的110 kV配电网中，除了主电源侧变压器中性点经电阻接地外，还有其他小电源经升压变压器接入110 kV系统，升压变压器的中性点也经电阻R_N接地。

当系统220 kV侧发生单相接地短路时，其零序等效电路如图9所示。

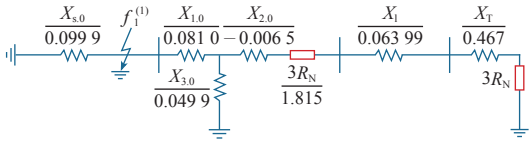

图9　两个中性点经电阻接地的零序等效电路

图9中文字符号与图2相同，其中$X_1=X_{1_1}+X_{1_2}$；数字为对应参数的标幺值，取$S_j=100$ MV·A，$U_j=U_p$。

当系统220 kV侧发生单相接地短路时，故障点零序电压源也可与$3R_N$所在支路构成零序电流通路，但由于$3R_N$远大于$X_{3.0}$，其中通过的零序电流将远小于$X_{3.0}$所在支路。

$$(X_{2.0}+3R_N+X_1+X_{T_2}+3R_N)X_{3.0}\approx X_{3.0} \tag{7}$$

即在此情况下，110 kV侧中性点接地电阻对220 kV侧零序电流的分流作用基本可以忽略不计。同理，与中性点直接接地系统相比，由于系统$X_{\Sigma 1}$、$X_{\Sigma 2}$的值均未变，$X_{\Sigma 0}$也基本未变，流过220 kV侧的$\dot{I}_0$也应与110 kV侧中性点直接接地时基本相同。

综上所述，110 kV中性点接地方式的改变对于220 kV侧零序电流的大小影响甚微，故220 kV侧的接地保护定值亦不必重新整定。

3. 仿真验证

仍以图1所示系统及元件参数为仿真模型，为检验上述结论的正确性，设在图9中220 kV侧f_1处发生单相接地故障，比较110 kV中性点在以下3种不同接地方式下流过各侧零序电流的大小。

1）T_1的110 kV中性点直接接地，T_2不接地。

中国知网 https://www.cnki.net

2）T_1的110 kV中性点经80 Ω电阻接地，T_2不接地。

3）T_1和T_2的110 kV中性点都经160 Ω接地。

仿真结果如表2所示。

表2　不同接地方式对220 kV侧I_0影响

110 kV接地方式	故障点$3\dot{I}_0$	220 kV侧$3\dot{I}_0$	T_1主变压器侧$3\dot{I}_0$
T_1直接接地 T_2不接地	5 711∠−0.953°	4 086.4∠−0.602°	1 619.9∠0.423°
T_1经80 Ω接地 T_2不接地	5 711∠−0.311°	4 086.6∠−0.511°	1 619.9∠0.423°
T_1、T_2均经160 Ω接地	5 711∠−0.299°	4 086.2∠−0.641°	1 620.7∠0.536°

仿真结果表明，在220 kV侧发生单相接地故障时，110 kV中性点接地方式的改变对220 kV侧零序电流基本没有影响。

4. 110 kV中性点经电阻接地对中低压侧保护影响

110 kV降压变压器的电压比一般为110/38.5/10.5 kV，接线方式为YNyn0d11，当在中性点经电阻接地的110 kV侧发生接地故障时，对于经△形接线引出的10.5 kV低压侧而言，不会出现零序电压和零序电流；对于绕组接成Y形或yn形的38.5 kV中压侧来讲，由于所带负载一般接成Y形或△形，亦不能构成零序电流回路[8]。因此，110 kV侧中性点改经电阻接地后，不会影响到中、低压侧的接地保护。

结束语

综上所述，110 kV中性点改经电阻接地后，会对本电压等级和相邻的高、低压侧的接地保护产生以下影响。

1）由于系统的零序等效电阻远大于零序电抗，导致零序阻抗角发生很大的改变，原来用于直接接地系统的线路保护配置的零序方向元件可能造成误动和拒动，必须重新设定最大灵敏角。改进措施为将原零序方向元件的φ_{lm}改为180°，以此角度为参考确定动作范围。

2）110 kV中性点改经电阻接地后，除了本电压等级的接地保护需重新整定计算外，对于相邻高压侧的接地保护影响甚微，对于相邻低压侧无影响，因此原接地方式下的220 kV侧、38.5 kV侧和10.5 kV侧的保护定值不必重新整定。

参考文献

[1] 李豁荪．110 kV 系统中性点接地方式的商榷 [J]．供用电，2005，21 (5)：11-13．

[2] 冯光亮，曾国，孙珊，等．一种抑制和消除接地故障电压跌落方法的研究 [J]．电气应用，2013，32 (13)：43-47．

[3] 曾国，冯光亮，孙珊，等．110 kV 电阻接地系统电压跌落及工频过电压的研究 [J]．电气应用，2013，32 (24)：54-58．

[4] 曾国，何晓章，孙珊，等．110 kV电阻接地配电网的接地保护研究 [J]．电气制造，2013 (3)：37-40．

[5] 杨丽勤，杨晓萍，梁振锋，等．基于EMTP和Matlab 的继电保护仿真系统 [J]．电网与清洁能源，2009 (11)：33-36．

[6] 张保会，尹项根．电力系统继电保护 [M]．北京：中国电力出版社，2005．

[7] 何仰赞．电力系统分析 [M]．武汉：华中科技大学出版社，2002．

[8] 陈慈萱．电气工程基础 (上) [M]．北京：中国电力出版社，2003．

（收稿日期：2015－03－10）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

中国知网　https://www.cnki.net