

Dual Setting Value Direction Overcurrent Protection Method for Distribution Network Connected to Distributed Generation

LI Haifei *

(State Grid Hulunbeier Power Supply Company, Hulunbeier Inner Mongolia 021000, China)

Abstract: The popularity of distributed generation in distribution network is getting higher and higher. Due to the connection of multiple distributed generation, the traditional directional overcurrent protection may not be able to meet the demand. A dual setting directional overcurrent protection method without communication assistance is proposed. With the goal of determining the optimal forward and reverse setting values of relay protection and minimizing the total action time of relay protection, the protection method is described as a nonlinear programming problem, and an algorithm is established to solve it. The proposed protection method is applied to the 33-bus radial distribution network with distributed generation, and the performance is compared with the traditional protection method which relies on standard over-current relay and directional over-current relay. The results show that for the radial distribution network, the protection coordination failure caused by the reverse fault current of the distributed power supply can be reduced by using the proposed method, and auxiliary communication and additional relays are not needed, indicating that the proposed method has high protection performance.

Key words: overcurrent protection; distributed generation; dual setting

EEACC: 8140

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.01.037

接入分布式电源的配电网双整定值方向过电流保护方法

李海绯 *

(国网呼伦贝尔供电公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘 要: 分布式电源在配电网中的普及率越来越高, 由于多台分布式电源的接入, 传统的方向过流保护可能无法满足需求。提出了一种无需通信辅助的双整定值方向过流保护方法。以确定最优的继电保护正反向整定值和最小化继电保护的总动作为目标, 将保护方法描述为非线性规划问题, 并建立算法进行求解。将所提出的保护方法应用于 33 节点具有分布式电源的放射状配电网, 并与传统的依赖标准过流继电器和方向过流继电器的保护方法进行了性能比较。结果表明, 对于放射状配电网, 该方法能够减轻分布式电源反向故障电流引起的保护配合失效问题, 且不需要辅助通信, 也不需要额外的继电器, 具有较高的保护性能。

关键词: 过电流保护; 分布式电源; 双整定值

中图分类号: TM774

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2023)01-0223-09

故障保护是配电系统规划中的一项基本内容^[1]。其中保护配合策略用于确定每个故障位置的主保护装置和备用保护装置的動作顺序, 保护配合策略的最低要求是仅隔离受故障影响的区域^[2]。配电系统通常设计成放射状运行, 以单向进行电能传输, 这种单向功率流可接受相对简单的保护策略。因此, 在传统的配电系统中, 通常采用如过流继电器、重合闸和熔断器这类简单的保护装置^[3-5]。然而, 由于双向潮流的存在, 以及分布式电源的并网给

配电网保护带来了一定挑战。分布式电源对配电系统保护的影响包括继电保护配合失效、熔断器误跳、继电保护触点不足等问题^[6]。因此, 近期的研究工作集中在提出新的保护方法, 以减轻分布式电源并网对系统保护配合的影响。

在文献[7]中对于含分布式电源的放射状配电系统, 提出了依赖于每条线路上配置的两个过流继电器的保护方法, 可优化总的保护时间。在文献[8]中, 在分布式电源所连接的馈线上增加了一个

过流继电器与系统上的其他继电器配合,以减少保护配合故障。在文献[9]中,提出了一种基于智能通信的保护方法,利用过流继电器来保护带有分布式电源的放射状配电网。文献[10]基于随机混合整数线性规划优化继电保护动作时间,确定含分布式电源的配电网中过流继电器的最优整定。上述方法都依赖于过流继电器,而且未考虑分布式电源反向故障对保护配合的影响,还需要辅助通信。在文献[11-13]中提出的保护方法也依赖过流继电器,而且随着系统规模的增大,反向故障电流的影响变得更加严重。文献[14]分析了分布式电源反向故障电流对过流继电器整定的影响,结果表明分布式电源的大小和位置会对保护整定产生不利影响。

为了减轻这种影响,在文献[15-16]中,提出了基于方向过流继电器的保护方法。在文献[17]中,通过为每个继电器关联其他继电器的闭锁信号,进一步增强了保护效果。上述方法需要在每条线路中设置额外的继电器,或者需要通信基础设施来避免配合故障。

相关学者已经提出了几种适用于含分布式电源的网状配电系统的保护方法^[18-19]。考虑到分布式电源的存在可能会使过流继电器失去配合,恢复过流继电器配合的有效解决方法之一是使用故障电流限制器^[20]。然而,随着分布式电源渗透率的增加,相关的成本将会增加。在文献[21]中,继电器安装在线路的每一端,具有标准反时限过流继电器和距离继电器的组合特征。为了缩短保护动作时间,提出了双整定方向过流继电器^[22]。

本文提出了一种适用于分布式电源高渗透率的放射状配电网的双整定值方向过流保护方法。所提出的保护方法可以减少继电保护动作时间,处理分布式电源反向故障电流影响,并最大限度地减少需要安装的继电器数量,且不需要辅助通信或故障电流限制器。该方法被描述为一个非线性规划问题,其主要目标是最小化继电保护动作时间,同时保持对上下游故障的保护配合。将该方法应用于 33 节点放射状网络,并与文献[23]中提出的传统过流保护方法进行了比较。

1 问题表述

通常,过流继电器(Over-Current Relay, OCR)的动作时间由通过它的故障电流的反函数决定。控制继电器操作时间的特征方程因类型而异。过流继电器时间-电流特性方程为:

$$t_{ij} = \text{TDS}_i \frac{A}{\left(\frac{I_{sc_{ij}}}{I_{p,i}} \right)^B - 1} \quad (1)$$

式中: i 表示继电器, j 表示故障位置; t_{ij} 是继电器 i 在 j 位置故障跳闸所需的时间(s); $I_{sc_{ij}}$ 是继电器 i 在 j 位置故障时在电流互感器一次绕组处测量的短路电流; A 和 B 是根据文献[24]中标准正态逆特性分别设置为0.14和0.02时的常量; $I_{p,i}$ 是继电器 i 动作的阈值电流; TDS_i 是继电器 i 的时间刻度设置,用作调谐参数。

文献[23]中提出了一种基于时间-电流-电压过流继电器的保护方法,与传统继电器的时间-电流特性相比,该方法能够减少继电器的总动作时间。式(2)描述了时间-电流-电压继电器的工作时间特性:

$$t_{ij} = \text{TDS}_i \frac{A}{\left(\frac{I_{sc_{ij}}}{I_{p,i}} \right)^B - 1} \times \left(\frac{1}{e^{1-v_{fij}}} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中: α 是一个常量参数。另一方面,在文献[15]中提出了具有两对整定值的方向过流继电器。与仅在一个正向动作的传统方向继电器不同,双整定值方向过流继电器能够在正向和反向动作,但不同方向具有不同的整定值。

本文将时间-电流-电压特性与双整定值特性相结合,提出了一种适用于含分布式电源的放射状系统保护的双整定时间-电流-电压方向过流继电器。图1显示了时间-电流-电压双整定值方向过流继电器的正向特性。该继电器有两对不同的 TDS_i 和 $I_{p,i}$ 整定值:用于正向保护的 TDS_{fw} 、 $I_{p,fw}$ 和用于反向保护的 TDS_{rv} 、 $I_{p,rv}$ 。

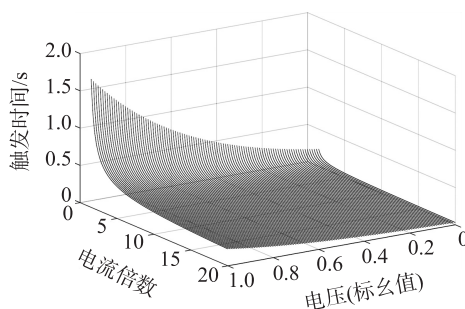


图1 时间-电流-电压双整定方向过流继电器正向特性

与文献[15]相比,本文提出的时间-电流-电压双整定值方向过流继电器在应用方面主要区别为:在放射状系统中,本文提出的继电器不需要任何辅助通信;正反向整定值既可用于主保护,也可用于后备保护。

本文继电器的时间-电流-电压特性可表示为:

$$t_{fw-ij} = TDS_{fwi} \frac{A}{\left(\frac{I_{sc_{ij}}}{I_{p,fwi}}\right)^B - 1} \times \left(\frac{1}{e^{1-v_{ij}}}\right)^\alpha \quad (3)$$

$$t_{rv-ij} = TDS_{rvi} \frac{A}{\left(\frac{I_{sc_{ij}}}{I_{p,rvi}}\right)^B - 1} \times \left(\frac{1}{e^{1-v_{ij}}}\right)^\alpha \quad (4)$$

式中: t_{fw-ij} 、 TDS_{fwi} 和 $I_{p,fwi}$ 表示继电器正向动作时间、继电器正向时间刻度设置、继电器正向电流设置参数,而 t_{rv-ij} 、 TDS_{rvi} 、 $I_{p,rvi}$ 表示继电器反向动作时间、继电器正向时间刻度设置、继电器正向电流设置参数。 v_{ij} 是继电器 i 在故障位置 j 处测量的每相电压。

保护整定问题的主要目标是在保持保护整定条件的前提下,使主、备用继电保护动作时间之和 T 最小。因此,目标函数可以表示为:

$$\text{Minimize } T = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^M \left[t_{fwij}^p + \sum_{k=1}^K (t_{fwij}^{bk} + t_{rvij}^{bk}) + (t_{rvij}^p + \sum_{k=1}^K t_{rvij}^{bk}) \right] \right\} \quad (5)$$

式中: i 表示故障位置, N 是考虑的故障位置总数, j 表示继电器, M 是继电器总数。上标 p 表示主继电器, bk 表示继电器 k 的备用继电器, K 是每个主继电器的备用继电器的数量。保护配合优化模型考虑了必须满足的约束条件,以求每个继电保护正反向动作的最优可行解。

首先是继电器设定值上下限约束。每个继电器的 TDS_i 值受下限 $TDS_{i,min}$ 和上限 $TDS_{i,max}$ 的约束,分别设置为 0.05 和 5,如式(6)所示。类似地,每个继电器的 $I_{p,i}$ 被限制在 $I_{pmin,i}$ 和 $I_{pmax,i}$ 之间,如式(7)所示。其次在正向和反向两种动作下,每个继电器的 $I_{pmin,i}$ 被设定为其保护线路额定负载电流的 1.6 倍,以确保每个继电器仅在故障发生时跳闸。此外,常量参量 α 的下限和上限分别被设置为 $\alpha_{min} = 0$ 和 $\alpha_{max} = 5$,如式(8)中所示。

$$TDS_{i,min} \leq TDS_{fwi}, TDS_{rvi} \leq TDS_{i,max} \quad (6)$$

$$I_{pmin,i} \leq I_{p,fwi}, I_{p,rvi} \leq I_{pmax,i} \quad (7)$$

$$\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max} \quad (8)$$

最后,后备继电器应在特定时间间隔后配合主继电器运行。主保护和后备保护之间的这种动作时间差称为配合时间间隔 (Cooperate Time Interval, CTI),在本研究中将其设置为 0.2 s。所描述的关系表示如下:

$$\left. \begin{aligned} t_{fwij}^{bk} - t_{fwij}^p &\geq CTI \\ t_{fwij}^{bk} - t_{rvij}^p &\geq CTI \\ t_{rvij}^{bk} - t_{rvij}^p &\geq CTI \end{aligned} \right\} \forall j \quad (9)$$

例如,对于图 2 中 F51 处的故障,主继电器 R_{18} 正向动作和 R_{19} 反向动作。在这种情况下,后备继电器将是继电器 R_{18} 的 R_1 正向动作和 R_2 反向动作,以及继电器 R_{19} 的 R_{20} 反向动作。继电器动作时间的下限为 0.1 s,最长时间为 2.5 s。上述问题通过使用 MATLAB Optimization Toolbox 来求解。在有分布式电源的情况下,单一整定值继电保护可能会导致保护配合故障。另一方面,文献中提出的双整定值继电器需要通信,并且是基于电流的,因此需要更长的故障清除时间。而本文所提出的继电保护方法依赖于电流和电压,不需要辅助通信。

2 仿真实验

对 33 节点放射状配电系统进行建模,分析了所提出的时间-电流-电压双整定值方向过电流保护方法的性能。此外,还与其他过电流保护方法进行了比较分析。采用传统过流继电器的保护方法,只需要 32 个继电器,并安装在线路的一端,如图 2 所示,该系统的总容量为 5.084 MW 和 2.547 MVAR。

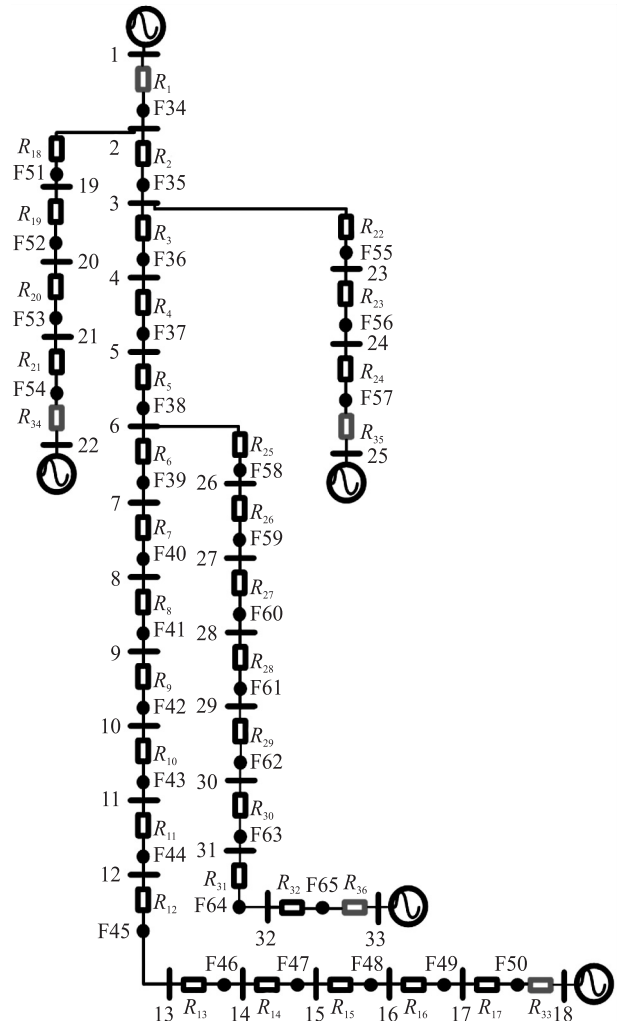


图 2 在所提出方法下的 33 节点系统

同的故障位置,备用继电器 R_{17} 将在 0.103 s 动作,而主继电器 R_{16} 在 0.612 s 才动作。对于所研究的系统,保护配合失效的总数为 28 次。

表 1 常规方法上游和下游故障继电器动作时间 单位:s

故障位置	动作时间/s			
	上游		下游	
	主保护	后备保护	主保护	后备保护
F48	R15 0.407	R14 0.607	R16 0.612	R17 0.103
F63	R30 0.42	R29 0.62	R31 2.185	R32 0.132

4.2 时间-电流-电压方向继电器保护方法

为了缓解在有分布式电源的情况下使用常规过流继电器的保护配合失效问题,提出了时间-电流-

电压方向继电器保护方法,在此方法下方向过流继电器位于每条线路的两端。表 2 给出了对于选定故障的继电器动作时间,而表 3 给出了最佳继电保护整定值。

通过与常规过流保护方法的比较可以看出,对于 F48 处的故障,下游继电器 R_{27} 将作为继电器 R_{29} 的后备,而上游继电器 R_{32} 将作为相同故障时继电器 R_{30} 的后备。在最佳整定下, R_{29} 和 R_{27} 的继电器动作时间分别为 0.1 s 和 0.3 s。同样, R_{30} 和 R_{32} 的最佳继电保护动作时间分别为 0.1 s 和 0.3s。由此可见,时间-电流-电压方向过流继电器能够为上下游故障提供充分的保护配合。

表 2 时间-电流-电压方向保护方法继电器动作时间

故障位置	动作时间/s			故障位置	动作时间/s			障位置	动作时间/s			障位置	动作时间/s		
	主保护	备用 1	备用 2		主保护	备用 1	备用 2		主保护	备用 1	备用 2		主保护	备用 1	备用 2
F34	R1 0.192 R2 0.1	R4 0.3	R36 0.3	F37	R7 0.1 R8 0.11	R5 0.3 R10 0.31		F51	R35 0.1 R36 0.28	R4 0.62 R38 0.48	R1 0.3	F55	R43 0.1 R44 0.3	R3 0.386 R46 0.5	R6 0.591
F35	R3 0.1 R4 0.9	R1 0.4 R6 0.39	R36 0.5 R44 0.39	F46	R25 0.1 R26 0.1	R23 0.3 R28 0.3		F52	R37 0.1 R38 0.1	R35 0.53 R40 0.3		F59	R51 0.1 R52 0.21	R49 0.3 R54 0.41	
F36	R5 0.1 R6 0.32	R3 0.3 R8 0.52	R44 0.5	F48	R29 0.1 R30 0.1	R27 0.3 R32 0.3		F53	R39 0.1 R40 0.1	R37 0.3 R42 0.3		F61	R55 0.18 R56 0.1	R53 0.38 R58 0.3	

表 3 时间-电流-电压方向保护方法最佳整定值

继电器	TDS/s	I_p/A	继电器	TDS/s	I_p/A	继电器	TDS/s	I_p/A	继电器	TDS/s	I_p/A
1	1.005	3.792	33	0.05	1.048	17	0.272	1.918	49	0.186	3.629
2	0.05	2.045	34	0.166	0.605	18	0.099 5	0.5	50	2.5	0.339
3	0.406	3.892	35	5	0.358	19	0.11	2.019	51	1.299	1.823
4	0.325	1.411 2	36	5	0.254	20	0.057 6	0.521	52	0.05	0.562
5	0.353	4.245	37	2.537	3664	21	0.642	1.466	53	1.077	1.155
6	5	0.439	38	0.072	0.586	22	0.05	0.531	54	0.058 4	0.563
7	1.216	2.234	39	0.899	1.884	23	0.458	1.257	55	0.378	1.959
8	0.05	0.962	40	0.132	0.594	24	0.07	0.532	56	0.112	0.568
9	0.747	2.27	41	0.05	2.747	25	0.252	1 354	57	0.539	1.677
10	0.108	0.96	42	0.09	0.623	26	0.127 1	0.538	58	0.066	0.596
11	0.464	2.792	43	5	0.145	27	0.238	1.271	59	0.326	1.59
12	0.111	0.465	44	5	0.287	28	0.077	0.565	60	0.078 2	0.603
13	1.008	1.676	45	3.856	0.093	29	0.49	1.024	61	0.2	1.622
14	0.051 7	0.487	46	0.053	0.62	30	0.065	0.58	62	0.091	0.619
15	1.028	1.226	47	1.967	0.641	31	0.331	0.951	63	0.05	1.655
16	0.068	0.492	48	0.096	0.624	32	0.137	0.578	64	0.058	0.64

4.3 所提出的过流保护方法

在本小节中,设计了时间-电流-电压双整定值方向过流保护方法,以便为具有分布式电源的放射状配电系统提供足够的保护。该方法依赖于双整定值继电器和时间-电流-电压过流继电器的组合。该方法依赖于将所有馈线过流继电器转换为时间-电流-电压方向双整定值继电器,该继电器可以正向和反向动作,但具有不同的整定值。如图 2 中所示,过流继电器的作用是针对电源故障为系统提供保护。

提出的保护方法被优化求解,以确定继电保护整定值。 α 的最佳值为 5,表 4 列出了双整定值时间-电流-电压方向过流继电器的最佳整定值。如表 4 所示,除继电器 R_1 、 R_{33} 、 R_{34} 、 R_{35} 和 R_{36} 外,所有继电器均有两对正向和反向动作整定值。表 5 列出了在所提保护方法下,一些故障位置的继电器动作时间。从结果可以看出,包括保护配合约束在内的所有约束都得到了满足,其中后备保护在配合时间间隔后运行。

表 4 所提出方法最佳整定值

继电器	TDS_fw/s	I_p/A	TDS_rv/s	I_p/A
1	0.918	3.868	—	—
2	0.406	3.892	0.101	1.439
3	0.358	4.232	5	0.324
4	1.217	2.222	0.069	0.933
5	0.754	2.264	0.055	0.956
6	0.463	2.79	5	0.193
7	1	1.677	0.1	0.467
8	1.026	1.228	0.052	0.487
9	0.272	1.918	0.068	0.493
10	0.111	2.018	0.099	0.499
11	0.641	1.466	0.057	0.521
12	0.462	1.255	0.05	0.531
13	0.253	1.352	0.07	0.531
14	0.238	1.27	0.127	0.538
15	0.48	1.023	0.077	0.565
16	0.33	0.95	0.065	0.58
17	0.05	1.047	0.138	0.579
18	5	0.357	0.184	0.538
19	2.536	0.036	0.05	0.583
20	0.899	1.885	0.083	0.583
21	0.582	1.802	0.131	0.594
22	5	0.144	0.105	0.583
23	3.856	0.093	0.076	0.601
24	0.347	2.554	0.067	0.615
25	0.186	3.626	0.298	0.493
26	1.295	1.824	0.095	0.54
27	1.075	1.157	0.05	0.561
28	0.377	1.958	0.061	0.563
29	0.538	1.676	0.111	0.568
30	0.327	1.591	0.066	0.594
31	0.2	1.621	0.078	0.603
32	0.05	1.654	0.091	0.618
33	—	—	0.165	0.604
34	—	—	0.09	0.623
35	—	—	0.096	0.624
36	—	—	0.058	0.64

表 5 所提方法下继电器动作时间

故障位置	动作时间/s			故障位置	动作时间/s		
	主保护	备用 1	备用 2		主保护	备用 1	备用 2
F34	R1fw 0.188	R3fv 0.3	R22rv 0.3	F51	R18fw 0.1	R2rv 0.62	R1 0.3
	R2rv 0.1	R19rv 0.3			R19rv 0.151	R20rv 0.35	
F35	R2fw 0.1	R1fw 0.41		F52	R19fw 0.1	R18fw 0.53	—
	R3rv 0.25	R4rv 0.45	R18rv 0.3		R20rv 0.1	R21rv 0.3	
F36	R3fw 0.1	R2fw 0.3	R22rv 0.5	F53	R20fw 0.1	R19fw 0.3	—
	R4rv 0.1	R5rv 0.3			R21rv 0.3	R34rv 0.3	
F37	R4fw 0.1	R3fv 0.3	R25rv 0.3	F55	R22fw 0.1	R2fw 0.386	R3rv 0.37
	R5rv 0.1	R6rv 0.4			R23rv 0.1	R24rv 0.3	
F47	R14fw 0.1	R13fw 0.3		F61	R28fw 0.1	R27fw 0.3	
	R15rv 0.1	R16rv 0.3			R29rv 0.1	R30rv 0.3	
F48	R15fw 0.1	R14fw 0.3		F62	R29fw 0.1	R28fw 0.3	
	R16rv 0.1	R17rv 0.3			R30rv 0.1	R31 0.3	
F50	R17fw 0.1			F65	R32f 0.18		R31fw 0.38
	R33rv 0.1	R16fw 0.3			R36 0.1		

在故障位置 F48, 可以看到主继电器将是 R_{15} (正向动作) 和 R_{16} (反向动作)。在这种情况下, R_{15} 的后备继电器为 R_{14} (正向动作), 继电器 R_{16} 的后备继电器为 R_{17} (反向动作)。如表 5 所示, R_{15} 和 R_{16} 的主要运行时间为 0.1 s。对于分布式电源引起的上游故障电流, 时间-电流-电压方向过电流方法和所提出的方法主保护动作时间均为 0.1 s。时间-电流-电压方向和所提出的方法均能缓解保护配合故障。

对于故障 F48, 在所提出方法下后备继电器 R_{14} (正向动作) 和 R_{17} (反向动作) 的动作时间均为 0.3 s。与方向过流保护方法相比, 所提出的方法需要的继电器数量减少了约 45%。此外, 所提出的方法需要额外 4 个过流继电器 (每个分布式电源一个)。与时间-电流-电压方向过流保护的 32.1 s 相比, 使用所提方法的继电器保护总动作时间为 30.84 s。

当在网状系统中应用双整定值继电器时, 它们需要辅助通信^[15], 以避免继电器在主继电器之前对其区域外的故障动作, 从而保持适当的保护配合。相反, 本文所提出的方法在放射状系统中应用时不需要辅助通信。

为了验证所提出的方法不需要通信基础设施, 表 6 列出了一组继电器在不同故障位置的动作时间。例如, 对于 F47 处的故障, 下游主继电器是 R_{14} (正向动作), 而继电器 R_{13} (正向动作) 充当 R_{14} 的后备, 而 R_{12} 充当第二后备。 R_{14} 的动作时间为 0.1 s, R_{13} 的动作时间为 0.3 s, 而继电器 R_{12} 的动作时间为 0.6 s。参考同一故障位置, 上游继电器 R_{16} (反向动作) 将作为继电器 R_{15} (反向动作) 的第一后备, 继电器 R_{17} (反向动作) 将作为继电器 R_{15} (反向动作) 的第二后备。在最佳整定下, R_{15} (反向动作) 动作时间为 0.1 s, R_{16} 动作时间为 0.3 s, R_{17} (反向动作) 动作时间为 0.829 6 s。因此, 与文献[15]中的情况不同, 第二后备不需要闭锁通信信号。

表 6 所提方法下区外故障继电器动作时间

故障位置	动作时间/s			故障位置	动作时间/s		
	主保护	备用 1	备用 2		主保护	备用 1	备用 2
F36		R2		F36		R6rv	
	R3	0.3	R1		R4rv	R5rv	0.47
F47	0.1	R22rv	1.63	F47	0.1	0.3	R25rv
		0.412	0.61				0.45
F61	R14	R13	R12	F61	R15rv	R15rv	R17rv
	0.1	0.3	0.61		0.1	0.1	0.83
F61	R28	R27	R26	F61			
	0.1	0.3	1.08				

由于通信延迟和故障不会显著影响保护方法的运行, 当前智能配电网的发展趋势是使用辅助通信。

但对于缺乏通信基础设施的配电网,所提出的保护方法可利用双整定值方向过流继电器及时有效地进行故障检测和隔离。

4.4 接入分布式电源时所提保护方法的性能

为了进一步验证所提出的保护方法,在图 2 所示的配电系统配备了四台额定电流为 0.5 MVA 的逆变式分布式电源,分别位于 18、22、25 和 33 号节点上。该系统还包括图 2 所示的同期式分布式电源。表 7 给出了继电器的最佳整定。可以看出,与表 4 中的结果相比,逆变式分布式电源的存在对继电器整定的影响很小。继电器 17、21、24 和 32 的整定值发生了较大变化。这是因为与同期式分布式电源相比,逆变式分布式发电的故障电流影响较小。此外,还发现 α 的最佳值为 5,这与同期式分布式电源情况的结果相似。

4.5 在考虑动态变化的情况下所提方法的性能

本小节研究配电系统动态变化对最佳继电保护整定的影响。系统中的动态变化会影响系统的整体配置,从而导致故障电流大小的变化。这反过来会对保护配合产生影响。对于所提出的保护方法,图 2 中给出的配电系统的最佳继电保护设置是分别考虑节点 3 和节点 23 之间的线路、节点 2 和节点 19 之间的线路以及节点 6 和节点 26 之间的线路的中断而确定的。表 8 列出了在节点 6 和节点 26 之间的线路开路情况下的最佳整定。与表 4 中提供的整定值相比,配电系统中的动态变化会对最佳继电保护整定产生较大影响。 α 的最佳值为 4.34。对于配备了可靠的通信基础设施和中央保护单元的系统,继电保护设置可以随着系统配置的变化而自适应地改变。

表 7 在逆变式分布式电源存在的情况下所提方法最佳整定值

继电器	TDS_fw/s	I_p/A	TDS_rv/s	I_p/A	继电器	TDS_fw/s	I_p/A	TDS_rv/s	I_p/A
1	0.942 6	3.848 3	—	—	19	2.539 1	0.036	0.05	0.584
2	0.407 3	3.889	0.09	1.44	20	0.9	1.882	0.082	0.584
3	0.358 6	4.231	5	0.325	21	4.652 9	0.08	0.13	0.5954
4	1.224 7	2.212	0.069	0.934	22	5	0.145	0.103	0.5834
5	0.745	2.274	0.055	0.956	23	3.855	0.093	0.075	0.6014
6	0.464	2.79	5	0.193	24	0.058	3.279 4	0.067	0.6154
7	1	1.676	0.1	0.467	25	0.186	3.625	0.31	0.4924
8	1.027 8	1.228	0.052	0.487	26	1.295	1.824	0.095	0.544
9	0.272	1.916	0.068	0.493	27	1.075	1.155	0.05	0.5614
10	0.111	2.017	0.099	0.499	28	0.377	1.956	0.061	0.5634
11	0.642	1.465	0.057	0.521	29	0.539	1.674	0.11	0.5684
12	0.462	1.253	0.05	0.531	30	0.327	1.589	0.066	0.5944
13	0.253	1.351	0.07	0.531	31	0.2	1.619	0.078	0.6034
14	0.238	1.27	0.127	0.538	32	0.096	1.61	0.091	0.6184
15	0.49	1.022	0.077	0.565	33	—	—	0.165	0.6044
16	0.33	0.95	0.065	0.58	34	—	—	0.09	0.6234
17	4.99	0.073 8	0.137	0.579	35	—	—	0.095	0.6244
18	5	0.357	0.18	0.539	36	—	—	0.058	0.64

表 8 在动态情况下所提方法最佳整定值

继电器	TDS_fw/s	I_p/A	TDS_rv/s	I_p/A	继电器	TDS_fw/s	I_p/A	TDS_rv/s	I_p/A
1	0.56	3.781	—	—	15	0.223 9	1	0.076	0.967
2	0.186 5	4.086	0.05	1.19	16	0.161 9	0.935	0.066	1
3	0.172 3	4.344	0.05	0.275	17	3.63	0.027 2	0.136	0.995
4	0.552 4	2.519	2.37	0.671	18	4.82	0.039 4	0.09	0.54
5	0.319 8	2.412	0.05	0.684	19	0.5	0.966	0.05	0.579
6	0.174	2.737	0.05	0.693	20	0.38	2.096 1	0.05	0.583
7	4.286 4	0.1	0.075 8	0.71	21	3.156	0.037 8	0.065	0.59
8	0.365 2	1.54	0.05	0.743	22	0.899	1.591	0.1	0.576
9	1	0.578	0.06	0.756	23	0.753	1.147	0.05	0.6
10	5	0.3	0.09	0.771	24	2.5239	0.081 5	0.05	1.063
11	0.27	1.46	1.3	0.527	33			0.188 6	1.063
12	0.214	1.258	0.394	0.61	34			0.05	0.623
13	0.121 9	1.297	0.076	0.853	35			0.05	0.626
14	0.114 8	1.22	0.127	0.876					

5 结论

提出了一种基于时间-电流-电压双整定和过流继电器相结合的分分布式电源放射状配电网保护方法。该方法不依赖于辅助通信或故障限流器。对保护配合问题进行了数学规划建模,为每个双整定值继电器确定最佳整定值。针对常规过电流保护方法、时间-电流-电压方向过电流保护方法,以及所提出的保护方法这三者进行了比较研究。在接入分分布式电源的 33 节点系统上,以及典型的放射状配电系统对所提方法进行了测试,结果表明,所提方法与时间-电流-电压方向继电器方法的动作时间基本相同。然而,所提方法所需的继电器数量大约是时间-电流-电压方向继电器方法的一半,因此为放射状配电系统保护提供了一种经济高效的解决方法。

参考文献:

- [1] 曾祥君,尹项根,张哲,等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2001,21(6):84-89.
- [2] 郑涛,汤哲,张滋行. 基于限流电抗器的统一潮流控制器故障穿越策略及其与保护的配合[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):8-18.
- [3] 胡傲,黄景光,翁汉珣. 基于双向配置方向过流继电器的反时限后备保护优化整定策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):166-171.
- [4] 李斌,李永丽,黄强,等. 单相自适应重合闸相位判据的研究[J]. 电力系统自动化,2003(22):41-44.
- [5] 王晨,庄劲武,袁志方,等. 新型混合型限流熔断器方案设计及其中介恢复特性研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):148-156,21.
- [6] 谭笑,王主丁,李强,等. 计及多约束的多分布式电源接入配电网最大承载力分段算法[J]. 电力系统自动化,2020,44(4):72-80.
- [7] Tjahjono A, Anggriawan D O, Faizin A K. Adaptive Modified Firefly Algorithm for Optimal Coordination of Overcurrent Relays[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017,11(10):2575-2585.
- [8] Khanbabapour S, Golshan M E H. Synchronous DG Planning for Simultaneous Improvement of Technical, Overcurrent and Timely Anti-Islanding Protection Indices of the Network to Preserve Protection Coordination[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017,32(1):474-483.
- [9] Wan H, Li K, Wang K W. An Adaptive Multiagent Approach to Protection Relay Coordination with Distributed Generators in Industrial Power Distribution System[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(5):2118-2124.
- [10] Lwin M, Guo J, Dimitrov N B, et al. Stochastic Optimization for Discrete Overcurrent Relay Tripping Characteristics and Coordination[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(1):732-740.
- [11] Mahat P, Chen Z, Bak J B, et al. A Simple Adaptive Overcurrent Protection of Distribution Systems with Distributed Generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011,2(3):428-437.
- [12] Coffele F, Booth C, Dysko A. An Adaptive Overcurrent Protection Scheme for Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014,30(2):561-568.
- [13] Shen S, Lin D, Wang H, et al. An Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems with DGs Based on Optimized Thevenin Equivalent Parameters Estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017,32(1):411-419.
- [14] Zhan H, Wang C, Wang Y, et al. Relay Protection Coordination Integrated Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Sources in Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016,7(1):55-65.
- [15] Sharaf H M, Zeineldin H H, El-Saadany E. Protection Coordination for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities Using Communication Assisted Dual Setting Directional Overcurrent Relays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(1):143-151.
- [16] Saleh K A, Zeineldin H H, El-Saadany E F. Optimal Protection Coordination for Microgrids Considering N-1 Contingency[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017,13(5):2270-2278.
- [17] Nikolaidis V C, Papanikolaou E, Safigianni A S. A Communication-Assisted Overcurrent Protection Scheme for Radial Distribution Systems with Distributed Generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016,7(1):114-123.
- [18] Freitas W, Huang Z Y, Xu W S. A Practical Method for Assessing the Effectiveness of Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005,20(1):57-63.
- [19] Zhan H X, Wang C S, Yang W, et al. Relay Protection Coordination Integrated Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Sources in Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016,7(1):55-65.
- [20] El-Khattam W, Sidhu T S. Restoration of Directional Overcurrent Relay Coordination in Distributed Generation Systems Utilizing Fault Current Limiter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008,23(2):576-585.
- [21] Singh M, Vishnuvardhan T, Srivani S G. Adaptive Protection Coordination Scheme for Power Networks under Penetration of Distributed Energy Resources[J]. IET Gen-

- eration, Transmission & Distribution, 2016, 10 (15): 3919-3929.
- [22] Sharaf H M, Zeineldin H H, El-Saadany E. Protection Coordination for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities Using Communication Assisted Dual Setting Directional Overcurrent Relays [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 143-151.
- [23] Saleh K A, Zeineldin H H, Al-Hinai A. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using a New Time-Current-Voltage Characteristic [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 537-544.
- [24] 贺家李. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [25] Baran M E, Wu F F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 9(4): 101-102.



李海绯 (1975—) 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事电网继电保护运行管理工作, lwl20120724@126.com。