

[分布式电源]

考虑分布式电源接入的配电网 电流保护配置及整定方案

文/刘文慧

中国石油集团电能有限公司战略发展部

配电系统中的故障电流具有间歇性，对逆变型分布式电源的控制策略和故障特性进行了分析，并给出了一种基于正序故障附加网的全电流保护整定方法。利用PSCAD进行仿真试验，证明了该方法能够可靠、准确地识别出不同类型、不同位置的故障。

分布式电源（DG）是一种小型电力系统，其分布在现场，分散地接入到配电网中。DG是一种利用太阳能和风能等可再生能源的方法，在世界范围内广泛使用。但是，在现场访问分布式发电将改变分布网短路电流的大小和方向，从而使得常规电流保护变得困难；然而，由于断层电流的非线性和间歇性性质，很难调整和与保护相互作用。如果不能有效地解决电力系统中的继电保护问题，将不能使DG的渗透性得到进一步的改善。所以，对含有DG的配电系统进行保护设计的研究显得尤为必要。

近年来，包括DG的配电网的安全问题，已经引起了国内外相关专家和学者的广泛关注。解决方案分成两大类。

第一个方案是采用纵联差动保护，这种保护需要通信通道。保护方式是通过电源线路两端或多端的功率信息来判断是否存在故障，精度高，不受DG输出功率的改变。但纵联差动保护要求建立通信信道，提高了电力系统的运行费用；此外，在通信信道失效的情况下，此类保护会失效，需要采用其他的备用措施。

第二种方案是没有信道的保护，不需要通信。这种保护通常基于方向电流距离保护，并依据DG的故障特征及网络拓扑，对保护定数值进行自适应调节。

本文从电力变压器的失效特征开始，提出了一

种利用DG接入实现配电网电流保护的整定方法。

电力系统的分布故障特性分析

按照电网的方式，DG可以分为两种：一种是电动机；一种是逆变。逆变型DG是一种典型的可再生能源并网方式，是光伏、风电等可再生能源中最常用的一种，因此重点研究逆变型DG。

基于逆变器的分布式供电系统的配置和控制方案如图1所示。在图1中， U 、 I 分别表示逆变器直流端的输入电压和电流； C 是等价的DC汇流排； R 、 L 是交流侧等效电阻和电感。采用 dq 变换三相电压、三相电流，实现逆变型DG的输出。逆变型DG的主要控制方式有最大功率跟踪、低电压穿越、消除负序和限流等。

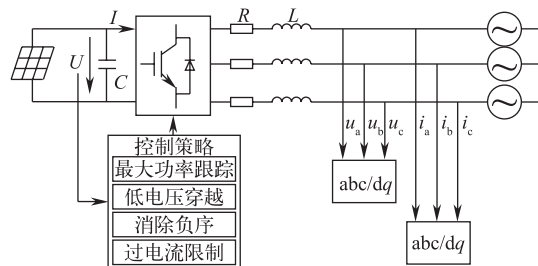


图1 基于逆变器的分布式供电系统的配置和控制方案

在常规工况下，DG为了达到最大的有功输出，采用了最大功率跟踪控制。在电网出现故障时，低

压通过控制策略需要DG按并网电压下降系数优先输出,这时DG的无功功率为

$$I_q = \begin{cases} 0 & y > 0.9 \\ K(0.9-y)I_N & 0.2 \leq y \leq 0.9 \\ 1.2 I_N & y < 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, K 为低穿压支承系数,通常要求不小于1.5; y 为一个并网电压下降系数,它的数值等于一个失效后的电压和一个失效之前的电压的幅度; I_N 为一个标称的输出电流。

当出现故障时,分布的电力供应也要增加,以保持平衡系统中的有功。然而,因为逆变器中的电力电子装置无法承受较大的电流,因此,逆变器DG采用的是过电流限流的控制方法,通常要求它的短路电流不能超过1.2。这样,逆变型DG的有功电流表达式为

$$I_d = \min \left[\sqrt{I_{\max}^2 - I_q^2}, \frac{P_{\text{ref}}}{U_{\text{PCC}}} \right] \quad (2)$$

式中, $I_{\max}$ 为逆变型DG的输出电流最大幅度; P_{ref} 为DG的基准有效功率; U_{PCC} 为在故障发生后DG并网处的电压幅度。

由式(1)和式(2)可知,故障后反向DG的短路电流幅度和角度为

$$I_{\text{DG}} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \arctan \frac{I_q}{I_d} \quad (4)$$

由式(1)~式(4)可知,反相DG故障电流的振幅和相位是由 I_d 和 I_q 的振幅测定,同时, L 与DG并联时的电压也有一定的关系。故障后的电压下降幅度受故障位置、故障类型和过渡电阻等因素的影响,由此可以看出,逆变器DG的短路电流具有明显的随机、非线性特征,与传统的直流侧有很大不同。

配电网中考虑到分布式供电的接入问题

传统电力配电网中的电流防护一般只在各个部分的前端设置。但是在DG网络上游部分,则需要要在DG的两端进行防护,如图2所示。

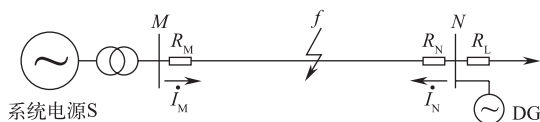


图2 包含DG的配电网

本文结合图2所示的MN分段作为实例,对包含DG分析了配电网的保护整定问题。本文以中国电网为研究对象,主要采用非接地(非接地、共振接地)为主,在单相接地的情况下,系统的故障电流较小,仍能维持较短的运行。因此,本文所讨论的电流保护架构及整定方法仅适合于相间短路。

1. 一种基于正序速断保护的自适应主保护方法

根据之前的分析,逆变型DG直流发电机采用正序电流来消除负序,而正序电流构成的电流保护方案,自适应的快速切断保护,可以根据不同的运行方式和不同的故障类型,对保护的定值进行实时的在线调整,其防护距离比传统的快速切断保护要大得多。现有的自适应电流快关断保护调整模式为

$$I_z = \left| \frac{K_k K_f E_s}{Z_s + Z_L} \right| \quad (5)$$

$$E_s = \left| \dot{U}_p + \dot{I}_p Z_s \right| \quad (6)$$

式中, $\dot{U}_p$ 和 $\dot{I}_p$ 分别是安装位置的正序电压和正序电流。

上述自适应电流保护整定方法并未考虑到DG的访问问题。在配电网中使用逆变型DG时,因为DG的短路具有非线性的和间断特性,使得其短路电流具有很强的随机性;此外,在DG的上游部分,系统端(头端)和DG端(尾端)保护之间的电流分布也有一些不同。因此,若仍使用式(5)所示的整定模式,将导致选择性地失去快速断开保护,因此,本文研究了一种新型的快速短路保护方案。

图2中如果出现了两个相间的短路,那么此时正序故障的额外网络如图3所示。

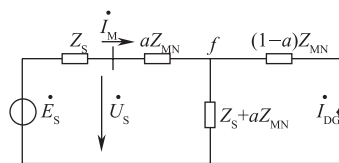


图3 双相短路故障在正序型故障中的应用

由图3得

$$\dot{I}_M = \frac{\dot{U}_M - \dot{I}_{\text{DG}}(Z_s + \alpha Z_{\text{MN}})}{Z_s + 2\alpha Z_{\text{MN}}} \quad (7)$$

式中, $\dot{U}_M$ 和 $\dot{I}_M$ 分别为系统侧保护RM处的正序电压和正序电流; α 为故障位置系数,其值等于故障点到母线M的距离与馈线MN总度长的比。

由于逆变型DG受到过电流限流控制战略的影响,其短路电流远小于系统的电源,因此,完全可以忽略不计。可以根据式(8)来调整在所处的适应性正序电流速断保护。

$$I_{MN} = \left| \frac{K_K \dot{U}_M}{Z_S + 2\alpha Z_{MN}} \right| \quad (8)$$

在DG侧的保护中,将正序故障附加网中的故障点左边的一部分进行合并,以方便分析。简化网络如图4所示。

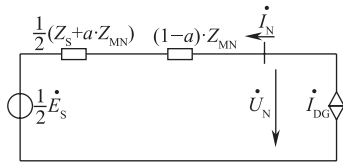


图4 正序型故障二相短路时的辅助网络的简化

从图4可知

$$\dot{U}_M - \frac{1}{2} \dot{E}_s = \frac{1}{2} \dot{I}_N [Z_S + (1+\alpha) Z_{MN}] \quad (9)$$

为了优先保障原则,可以根据式(10)来调整自适应正序电流速断保护。式(10)为

$$I_{NZ} = \left| \frac{K_K (2\dot{U}_N - \dot{E}_s)}{Z_S + 2Z_{MN}} \right| \quad (10)$$

当三相短路时,正序故障附加电网的额外阻抗为0,这时,正序电压与正序电流之间的关系为

$$\dot{U}_r = \dot{I}_r Z_{rf} \quad (11)$$

所以三相短路故障时,可以采用式(12)来调整两边的自适应正序电流速断保护。式(12)为

$$I_Z = \left| \frac{K_K \dot{U}_r}{Z_{MN}} \right| \quad (12)$$

2. 当线路末端发生故障时应急备用保护的设计

因为快速切断保护无法覆盖全部的电线,所以需要配备备用保护20,以探测线路的终端故障。为了克服直接访问对传统的电流保护产生影响,本文介绍一种采用两侧过电流互相作用的近备用保护方案。

具体实施方案:当一方保护判定在主保护的工作范围内出现故障时,将其视作区内故障,同时控制相应的断路器跳闸,并将区内故障指令发送给另一端;如果一方的主保护没有被激活,但是被另一方的操作指令所控制,那么就被认为是区域内部

的错误。因为在两个方向上的命令的通信量很小,并且对延迟的需求也很小,因此,无须建立通信通道,使用已有的无线网路就可以完成这一功能。

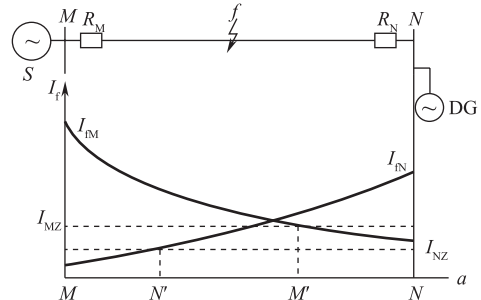


图5 近备用保护的基本原则

3. 基于定时限过电流保护的远程后备保护方案

该方法能正确、可靠地识别出含有DG的配电网中大部分的故障。在这种背景下,远端备用只是最不利条件下的一种选择,所以可以适当扩展保护范围和延长行动时间。提出了一种以闪避最大负载并覆盖整个馈线长度为基准的超电流保护的方法。为了区别于主要保护,远程备用保护可以设定0.5 s的延迟。

仿真分析

1. 仿真模型参数

为了检验所提出的整定方法在不同的失效情况下的有效性,采用PSCAD软件建立了带有DG的配电网模型,如图6所示。此模式具有10.5 kV的参考电压和100 MV·A的系统参考能力;DG具有4 MV·A的额定能力和1.5的低穿透电压支持因子;该模型与文献中所描述的模型基本一致。模拟馈线以B₁B₂为失效间隔,对不同故障距离的不同类型的故障进行了分析,防护了R₁和R₂的操作条件。

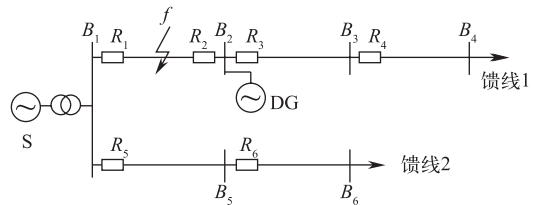


图6 DG接入的分配网络模型

2. 两相短路的模拟研究

当f点发生两相短路时,防护R₁和R₂按式(8)、式(10)等式计算自适应的电流快速关断保护的整定值。在馈线B₁B₂的不同位置上,保护R₁

和 R_2 的测量值和计算的整定值见表1。

表1 两相短路故障的模拟计算

故障位置系数	测量值/A		整定值/A	
	R_1	R_2	R_1	R_2
0.1	6 410	146.3	1 859	182.9
0.2	5 474	146.6	1 970	174.4
0.3	4 659	147.0	2 064	166.5
0.4	3 960	147.5	2 141	159.0
0.5	3 367	148.1	2 204	151.8
0.6	2 961	149.0	2 252	145.2
0.7	2 689	149.9	2 289	138.7
0.8	2 386	160.9	2 318	132.3
0.9	2 145	151.8	2 339	126.0

图7和图8给出了防护 R_1 和 R_2 的弧度。

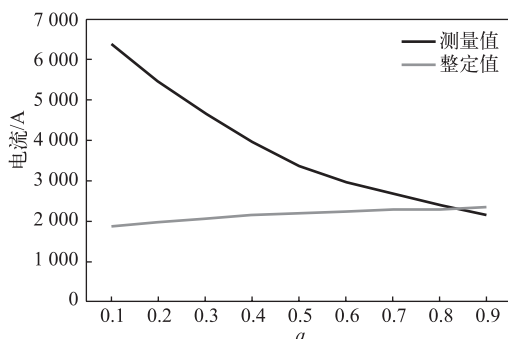


图7 两相短路下保护 R_1 上的电流与辨识曲线

从图7可以看出，当故障点的位置因子是0.8时，它的测量结果仍然比标准高。所以，在两相短路的情况下， R 防护距离可达到被保护线路的前端80%；类似地， R 的保护区域可覆盖如图8所示的40%的被保护线路的终端。两种方法的保护范围覆盖了被保护线路的全部长度，因此，本论文所提的近备用策略可对主保护拒动作局部故障作出正确的判别。

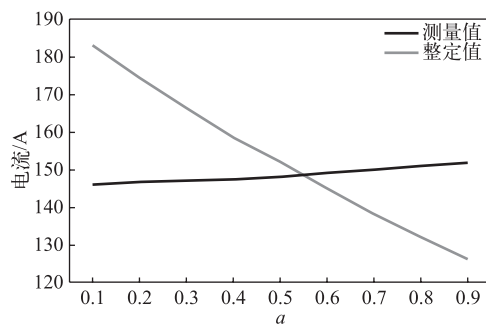


图8 两相短路下保护 R_1 的测定与整定值之间的关系

3. 三相短路模拟研究

三相短路故障时，保护 R_1 和 R_2 均给出了自适应电流快关断保护的整定值，这是由式（12）所确定的。在馈线 B_1B_2 中不同的地方，保护 R_1 和 R_2 的测量和计算的总数值见表2。这种主要保护方式在三相短路时被使用， R 的防护距离可达80%以上， R 防护距离能达到受保护线路的40%。因此，当被保护线路中的任意部位出现故障时，该方案都能正常工作。

表2 保护 R_1 和 R_2 的测量和计算的总数值

故障位置系数	测量值/A		整定值/A	
	R_1	R_2	R_1	R_2
0.1	12 692	267.7	3 384	332.9
0.2	10 844	271.2	3 625	320.2
0.3	9 239	274.9	3 839	309.7
0.4	7 856	278.8	4 025	298.9
0.5	6 683	282.9	4 188	288.4
0.6	5 884	287.6	4 301	278.8
0.7	5 343	292.3	4 418	269.1
0.8	4 720	295.3	4 531	259.3
0.9	4 283	302.1	4 626	249.4

4. 馈线末端故障时远后备保护的仿真结果

在不利条件下模拟，将时序限制过电流保护用作远程备用保护。作为例子，馈线1提供了一种用于保护整个线路长度的远程后备保护设备，处于保护 R_1 的位置。在保护 R_1 的整定值为2倍额定负荷时，保护 R 的整定值为240 A。在馈线1（母线 B_4 ）的末端处，测得 R_1 的电流为1 027.5 A，2 044.7 A比被保护的整定值高。采用限流保护结构的远端备用电路，可以对线路长度进行可靠的保护。

结束语

本文从电力系统的非线性、间隙特性出发，对电力系统中的直流输电线路进行了整定，并对其进行了控制策略和故障特点分析。其中，主保护采用了基于正序的快速关断保护、以两侧信息为基础的近备用保护和以定时限的方式实现远程备用保护。通过PSCAD的模拟试验，证明了该方法在DG的配电网中有良好的应用前景。EA

（收稿日期：2022.08.05）