含高渗透率DG的配电网加速自适应电流速断保护

随着分布式发电技术的快速发展，配电系统中分布式电源（Distribution Generator，DG）的渗透率水平不断提高，由于多个DG的接入，将可能出现电流速断保护同时动作的情况，使保护的选择性受到影响。针对这一问题，结合含高渗透率DG的配电网系统故障时的特性，在已有自适应电流速断保护的基础上，分析故障时各点电压对保护的影响，提出了一种基于电压加速的自适应电流速断保护方案，提高了电流速断保护的选择性。通过对一个10 kV配电系统的仿真分析，验证了该整定方法的正确性。

程永颢　和敬涵　胡　骏　叶豪东　代昀杨　刘　聪／北京交通大学电气工程学院

程永颢／硕士研究生

关键词／Keywords
分布式电源·
配电网·
电压因子·
加速自适应电流速断保护·

0　引言

近年来，以化石燃料为基础的发电技术所带来的环境污染问题日益严重，各界人士综合考虑了环境保护和能源安全等多方面因素，提出了大力发展安全、可靠和清洁新型能源的建议，因此分布式发电技术得到了快速发展并逐渐占据了主导地位。但是大量分布式电源（Distribution Generator，DG）接入配电网，使传统的配电网保护不可避免地受到影响。如DG的接入使配电系统从单电源辐射状网络变成了多源网络。正常运行时，网络中的潮流分布由于DG的接入而发生变化，当配电系统发生故障时，短路电流的大小和方向均会发生变化[1-3]，导致保护装置出现拒动作或者误动作，打破了传统配电系统中保护之间的配合关系，保护的动作行为和性能都会受到影响，甚至无法起到保护作用[4]。

国家自然科学基金（51277009）。

针对上述问题，国内外在传统电流保护的基础上进行了进一步的研究，考虑在故障情况下DG的输出电流与其容量或出力、故障类型和故障位置等因素有关，通过分析不同类型DG的故障特性，针对含DG配电系统保护定值不易整定的问题提出了一系列的自适应电流保护方案。文献[5]对含逆变型DG配电网的自适应电流保护进行了研究；文献[6]在此基础上考虑了光伏发电系统等逆变型DG接入配电网时具有的低电压穿越能力影响，进一步优化了自适应电流保护方案。但是上述研究主要分析了单个DG接入的情况，当DG数量较多，分布相对集中时，此类保护方案没有考虑各个保护之间动作时间上的配合，可靠性和选择性均存在不足。

文献[7]提出了一种基于低电压加速的反时限过电流保护方法，但是只考虑了保护的快速性，而对保护的选择性方面没有进行相应的研究。本文将这一方案进行相应的改进，并将其与传统的自适应电流速断保护相结合，引入时间间隔可靠系数K_u，提出一种无须借助通信的加速自适应电流速断保护方案，对传统的自适应电流速断保护选择性不足的问题进行了优化，实现了上下级保护之间的配合，满足了继电保护选择性的需求。

1　高渗透率DG对并网配电网的影响

目前多数配电网可看作单电源辐射状网络，发生故障时，短路电流基本

中国知网 https://www.cnki.net

上都是从系统电源流向故障点。在这种情况下，采用传统的电流速断保护能够实现良好的保护功能，同时可以快速、灵敏、可靠和有选择性地切除故障。

当大量的DG接入时，配电网变成了一个多元系统。当发生故障时，短路电流的大小和方向均会发生变化，导致保护装置出现拒动作或者误动作，从而影响配电网的运行与控制。DG并网对传统配电网保护的影响如图1所示。

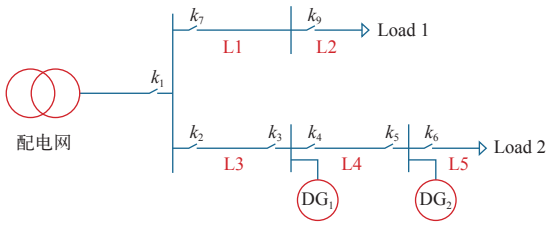


图1　DG对配电网保护的影响

主要表现在以下几个方面[8-9]：

1）导致本线路保护的灵敏度降低甚至拒动作。以线路L4故障为例，接入DG后，DG和系统电源都会向故障点提供短路电流，但是由于DG_1的分流作用，流过保护k_2的短路电流会减小。如果保护k_2的过电流保护定值不变，其灵敏度将会降低，严重时会拒动作。

2）导致线路保护误动作。当线路L1或L2处发生故障时，接入DG后，保护k_2会流过由DG提供的故障电流。如果该电流足够大，将导致k_2处保护误动作。

3）导致相邻线路瞬时速断保护误动作。当线路L1或L2处发生故障时，接入DG后，DG和系统都会提供短路电流，保护k_7流过的故障电流增大，可能导致其速断保护误动作，失去选择性。

4）导致上下级保护同时动作。当线路L1或L2处发生故障时，接入DG后，由于多个DG的接入，可能导致保护k_2、k_4流过的短路电流均大于整定值，从而导致其同时速断动作，失去选择性。

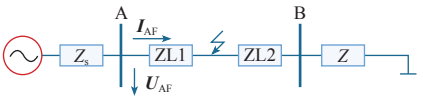
2　传统自适应电流速断保护的基本原理

传统的自适应电流速断保护是一种根据电力系统运行方式和故障状态的变化而实时地改变保护装置动作特性或整定值的保护。由此得到的在线整定值可以表示为[10]

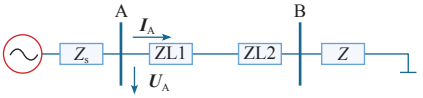
$$I_{\mathrm{op.z}}^{1}=\frac{K_{\mathrm{rel}}^{1}K_{\mathrm{d}}E_{\mathrm{S}}}{Z_{\mathrm{S}}+Z_{\mathrm{L}}} \tag{1}$$

式中，K_{rel}^{1}为保护的可靠系数；K_{d}为可自动估计的故障类型系数；E_{S}为保护背侧的系统电源等效电动势；Z_{S}为保护背侧的系统等效阻抗；Z_{L}为被保护线路的阻抗。

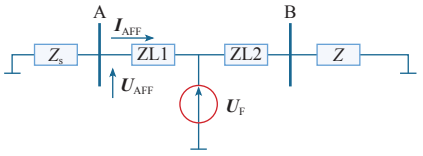
针对自适应电流速断保护的整定值，需要在线计算的参数有：故障类型系数K_{d}、保护背侧的系统电源等效电动势E_{S}和故障发生时保护背侧的系统等效阻抗Z_{S}。在自适应电流速断保护中一般运用故障分量的思想，即将故障状态分解为正常运行状态和故障附加状态。故障后的网络状态如图2a所示，正常运行状态如图2b所示，故障附加状态如图2c所示。考虑到有DG的接入，所以图中的$\boldsymbol{I}_{\mathrm{AFF}}$包含故障时DG输出电流的增量。故障附加状态是假设存在的状态，将故障位置等效为一个反向的故障电压源，图2b和图2c叠加起来可以得到图2a。



（a）故障状态



（b）正常运行状态



（c）故障附加状态

图2　含DG的配电系统故障分析

图2中母线A的电压和电流可以表示为

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{AF}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{AFF}}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{A}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{AF}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{AFF}}+\boldsymbol{I}_{\mathrm{A}} \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{U}_{\mathrm{AF}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{AF}}$为母线A在线路AB间发生短路故障后的电压和电流；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{AFF}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{AFF}}$为母线A在故障附加状态下的电压和电流；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{A}}$为母线A在系统正常

中国知网 https://www.cnki.net

运行时的电压和电流。

母线A在故障附加状态下的电压、电流称为故障分量，它能够反映出安装在母线A出口处的保护装置的故障信息。从图2可以看出，故障分量与故障发生前的负荷电压、电流无关，但是和系统电源的等效阻抗存在一定的关系，因此可以用故障附加状态下系统等效阻抗上的电压来表示故障电压分量，从而计算出系统电源的等效阻抗。

（1）故障发生时保护背侧的系统等效阻抗Z_S

根据图2c所示，保护背侧的系统等效阻抗为

$$Z_S = -\frac{\boldsymbol{U}_{1AFF}}{\boldsymbol{I}_{1AFF}} \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{U}_{1AFF}$、$\boldsymbol{I}_{1AFF}$为通过对称分量法求得的正序电压故障分量和正序电流故障分量。

（2）保护背侧的系统电源等效电动势E_S

系统的等效电动势E_S通过在线计算获得，其表达式为

$$E_S = U_{AF} + I_{AF}Z_S \tag{5}$$

式中，U_{AF}、I_{AF}分别为被保护线路故障时保护安装处的电压、电流。

（3）故障类型系数K_d

在相同的运行方式下，当配电系统处于同一地点分别发生两相短路和三相短路时，二者的短路电流之间存在如下关系

$$I_F^{(2)} = (\sqrt{3}/2)I_F^{(3)} \tag{6}$$

当发生两相短路故障时，流过保护的短路电流是同一位置发生三相短路时流过保护的短路电流的$\sqrt{3}/2$倍，此处，将发生三相短路时的故障类型系数K_d设为1，则发生两相短路时的故障类型系数K_d为$\sqrt{3}/2$，保证了电流速断保护在不同故障类型下具有相同的灵敏度，从而不会受到故障类型的影响，自适应电流保护亦是如此。

综上所述，传统的自适应电流速断保护只利用了保护安装处的电流信息，由于故障电流受运行状态、分布式电源控制方式等因素影响，变化范围较大，给线路保护的整定和配合带来了困难，所以应考虑结合故障时电压变化的特点，提高保护的可靠性和选择性。

3 含高渗透率DG配电系统的加速自适应电流速断保护

传统自适应电流速断保护只利用了保护安装处的电流信息，由于配电网中高渗透率DG的接入，同一个故障有可能使同一条馈线上不同保护安装处计算出的动作电流均能满足动作条件，从而使电流速断保护同时动作，失去保护的选择性。线路故障时除电流变化外，保护安装处电压值也会下降。当配电系统发生故障时，为了维持系统的电压与频率的稳定，DG需要提高自身的功率输出，当故障点距离DG很近时，DG的输出功率无法继续增加，系统电压将会进一步出现跌落，因此保护安装处电压跌落越严重时，说明此保护距离故障点越近。可以通过下述故障相电压的计算公式进一步验证。

当三相短路时，保护安装处故障相电压（标幺值）为

$$u^{(3)} = \frac{I_F^{(3)}Z_{F_equal}}{U_F} \tag{7}$$

当两相短路时，保护安装处故障相间的线电压（标幺值）为

$$u^{(2)} = \frac{2I_F^{(2)}Z_{F_equal}}{\sqrt{3}U_F} \tag{8}$$

式中，Z_{F_equal}为故障点到保护安装处的等效阻抗；U_F为线路相电压基准值。

由此引入电压加速因子u来反映保护安装处到故障点的距离，即保护安装处距离故障点越近，电压跌落越严重。因此根据这一故障特征提出利用电压加速策略来提高自适应电流速断保护的选择性。采用电压加速策略后，式（1）所表示的自适应电流速断保护动作时间t的计算公式为

$$t = K_u T_{set} u \tag{9}$$

式中，K_u为保护的动作时间间隔可靠系数，保证了上下级之间保护的动作时间差满足保护的选择性；T_{set}为保护的设置动作时间；u为电压加速因子。

由式（9）可以看出，当线路发生故障时，越是距离故障点近的保护，其低电压加速因子越小，一定程度上加速了保护的动作速度，从而能

中国知网 https://www.cnki.net

够保证上下级保护动作时间的配合关系。此外，为了保证反方向故障时保护在DG提供故障电流下不误动作，需要在DG上游的保护处增加方向元件以保证保护动作的选择性[11]。

4 仿真验证

利用Digsilent仿真软件搭建含高渗透率DG的配电系统，如图3所示，并对自适应加速电流速断保护进行验证。系统电压等级为10 kV，L12、L15、L23和L34的线路型号为YJV22－240，序参数分别为$X_1=X_2=0.091\ 2\ \Omega/km$，$R_1=R_2=0.075\ 4\ \Omega/km$，$X_0=0.364\ 8\ \Omega/km$，$R_0=0.754\ \Omega/km$；L56的线路型号为LGJ－185，序参数分别为$X_1=X_2=0.106\ 8\ \Omega/km$，$R_1=R_2=0.168\ 3\ \Omega/km$，$X_0=0.427\ 3\ \Omega/km$，$R_0=0.673\ 3\ \Omega/km$；其余的线路型号为JKLYJ－120，序参数分别为$X_1=X_2=0.417\ \Omega/km$，$R_1=R_2=0.256\ 7\ \Omega/km$，$X_0=1.423\ 9\ \Omega/km$，$R_0=1.026\ 7\ \Omega/km$。各母线负荷功率因数均为0.9，分布式电源$DG_1$～$DG_5$的最大输出功率分别为0.6 MV·A、0.5 MV·A、1 MV·A、0.5 MV·A和0.9 MV·A，功率因数均为0.95。所有DG的最大输出电流均为其额定电流的1.5倍。

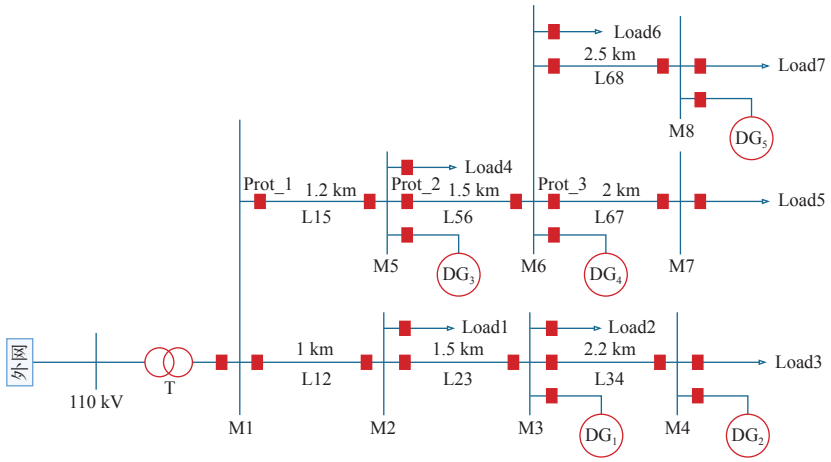


图3 仿真系统结构

仿真时设置故障并得到Prot_1、Prot_2和Prot_3的电压与电流，计算并比较采用电压加速与不采用电压加速时各保护的动作情况，仿真中设置的电流速断保护动作时间$T_{set}=50$ ms，故障时电流整定值按式（1）计算。

（1）并网运行时三相短路保护动作情况

当L67出口处发生三相短路故障时，保护Prot_1、Prot_2和Prot_3的动作情况如表1所示。其中保护的可靠系数K^1_{rel}取1.1，保护的动作时间间隔可靠系数K_u取1.2，U/U_N为电压加速因子，动作时间t为加入电压加速因子后各保护的动作时间。

表1 并网运行时L67三相短路保护动作情况

保护	故障电流/A	自适应整定电流/A	动作情况	U/U_N	动作时间/ms
Prot_1	5.737 8	5.772 8	不动作	0.844 4	–
Prot_2	5.727 6	5.460 1	动作	0.754 6	45.276
Prot_3	5.728 6	3.796 5	动作	0.569 2	34.152

从仿真结果可以看出，L67发生三相短路故障时，在不加入电压加速策略前提下，由于故障电流均大于保护安装处的电流整定值，所以保护2和保护3将会同时瞬间动作。而加入电压加速策略后，由于各保护安装处的电压不同，使保护的动作时间产生一个间隔时间Δt，当故障发生时，保护3在34.152 ms时先动作，此时保护2处的故障电流会发生变化，如果故障电流小于整定值，则保护2不再动作，避免了保护动作的重复性，同时保证了保护之间的配合。

（2）并网运行时两相短路保护动作情况

当L67出口处发生三相短路故障时，保护Prot_1、Prot_2和Prot_3的动作情况如表2所示。其

中国知网 https://www.cnki.net

中为了保证产生足够的动作时间间隔，此处的保护动作时间间隔可靠系数K_u取2.5。

表2 并网运行时L67两相短路保护动作情况

保护	故障电流	自适应整定电流	动作情况	U/U_N	动作时间t/ms
Prot_1	4.823 8	3.500 4	动作	0.844 9	105.61
Prot_2	4.802 9	3.443 4	动作	0.785 1	98.14
Prot_3	4.798 6	2.815 6	动作	0.7	87.5

由表2可以看出，当发生两相短路时，在不加入电压加速策略时，由于故障电流均大于保护安装处的电流整定值，所以保护1～保护3都会通过瞬间动作来切除故障，失去了保护间的配合。加入电压加速策略后，同样在各个保护动作时间上会产生一个间隔时间Δt，使保护的选择性得到保证，同时K_u在不同故障情况下选取不同的数值，是为了保证在时间间隔Δt内足够进行下一次故障电流与整定电流的比较。

5 结束语

针对含高渗透率DG配电网在发生故障时电流速断保护可能会同时动作的问题，本文提出了一种基于电压加速的自适应电流速断保护方法。该方法利用故障后保护安装处电压与故障位置的关系，提出采用电压加速因子使不同位置的保护动作时间产生一定的间隔，在保证故障快速切除的同时，实现了上下级保护之间的配合，提高了自适应电流保护的选择性。通过对一个10 kV配电系统的仿真分析，验证了该方法的正确性。

参考文献

[1] 冯希科，郜能灵，宋凯，等．DG容量对配电网电流保护的影响及对策研究 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (22)：156-160．

[2] 周卫，张尧，夏成军，等．分布式发电对配电网线路保护的影响 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (3)：1-5．

[3] 尚瑨，郜能灵，刘琦，等．考虑分布式电源的配电网保护改进方案研究综述 [J]．电力系统保护与控制，2012，40 (24)：40-45．

[4] Jenkin N，Allan R，Crossley P，et al．Embedded Generation [M]．London，UK：Institution of Electrical Engineers，2000．

[5] 孙景钌，李永丽，李盛伟，等．含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护 [J]．电力系统自动化，2009，33 (14)：71-76．

[6] 陈晓龙，李永丽，谭会征，等．含逆变型分布式电源的配电网自适应正序电流速断保护 [J]．电力系统自动化，2015，39 (9)：107-111．

[7] 李永丽，金强，李博通，等．低电压加速反时限过电流保护在微电网中的应用 [J]．天津大学学报，2011，44 (11)：955-960．

[8] 黄伟，雷金勇，夏翔，等．分布式电源对配电网相间短路保护的影响 [J]．电力系统自动化，2008，32 (1)：93-97．

[9] Doyle M T．Reviewing the impacts of distributed generation on distribution system protection [C]．Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting，July 21-25，2002，Chicago，IL，USA2002，1：103-105．

[10] 葛耀中．新型继电保护和故障测距的原理与技术 [M]．西安：西安交通大学出版社，2007．

[11] 丛伟，田崇稳，赵义术，等．基于电压变化量幅值比较的智能配电网故障方向元件 [J]．电力系统自动化，2014，38 (15)：93-99．

[12] 马静，王希，米超，等．含分布式电源的配电网自适应保护新方法 [J]．电网技术，2011，35 (10)：204-208．

[13] Wan Hui．Protection coordination in power system with distributed generations [D]．Hong Kong，China：Hong Kong Polytechnic University，2006．

[14] 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．

（收稿日期：2015－09－01）EA

中国知网 https://www.cnki.net