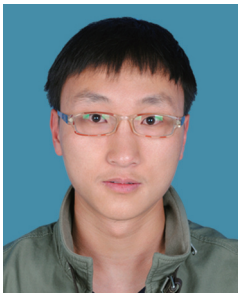
光伏并网发电对下游保护的影响研究

随着光伏发电技术的飞速发展，光伏容量占电网电源的比例逐渐增大，光伏接入配电网对继电保护的影响不容忽视。基于光伏发电系统的运行特性，理论分析了光伏接入配电网对下游电流三段式保护的影响。并以光伏电源通过联络线专线接入配电网为例，建立了光伏并网发电系统的暂态模型，详细分析了光伏电源接入对配电线路下游保护灵敏性、最小保护范围产生的影响。研究结果阐明，仿真算例验证了理论分析的合理性，对改善光伏发电系统保护的配置有一定的参考价值。

王海峰　李凤婷/可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心（新疆大学）
路　亮　刘光途/甘肃省电力公司风电技术中心



王海峰/硕士研究生

关键词/Keywords
光伏电源·
配电网·
下游保护·

太阳能作为一种无污染、取之不尽用之不竭的可再生能源，已经越来越多的被各个国家所重视。但是光伏接入配电网改变了配电网的网架结构和参数，势必会导致故障电流、负荷电流发生变化。随着光伏容量的不断增加，对于下游配电线路来说，会使保护的灵敏性、最小保护范围增加，严重时可能会使保护发生误动。文献[1-4]主要分析了光伏电站不同接入位置、不同容量以及不同故障点位置对配电网短路电流和线路保护产生的影响；文献[5]在原有配电网传统保护的基础上，针对含有分布式电源的配电网，在电流保护中，利用电抗器的高阻抗值特性限制分布式电源提供的短路电流，有利于故障点电弧熄灭和降低分布式电源机组检测到的负序电流，确保重合闸的正确动作；文献[6]详细分析了在不同重合闸方式下，分布式电源的接入对配电系统保护协调性所产生的各种可能的影响，给出了各种情况下消除分布式电源接入对配电网保护设备影响的判断条件。以上文献主要分析了光伏并网对保护的影响，但均未详细分析光伏并网对保护灵敏性、最小保护范围的影响程度。

本文结合光伏电源接入配电网的位置，建立了配电线路下游电流表达式，分析了含光伏配电网的故障电流、负荷电流，研究了不同容量光伏电源接入配电网对下游保护最小保护范围和灵敏性的影响。结合故障电流的特点构建了含光伏的配电网算例仿真模型，仿真获取下游保护安装处故障电流采样数据，对比不同容量光伏接入系统对短路电流、负荷电流的影响，进而分析对保护灵敏性和最小保护范围的影响。

光伏发电系统的运行特性

1. 光伏出力的随机波动性

太阳能的光照强度和天气条件对光伏发电的影响十分强烈。光伏的出力呈现一定的波动性。用PSCAD/EMTDC仿真软件搭建30 MW光伏电站仿真模型，当环境温度为25 ℃，光照强度为1 kW/m^{2}时，仿真光伏电站的输出特性如图1所示。

2. 光伏并网的故障电流、负荷电流特性

基于逆变技术的光伏发电短路电流的输出特性区别于传统旋转电流，其短路电流主要取决于逆变器电流饱和模块的限值，由于逆变器等电力电子装置的

国家自然科学基金项目（51267019），国家自然科学基金项目（51367017），新疆自然科学基金（2012211A002）。

中国知网 https://www.cnki.net

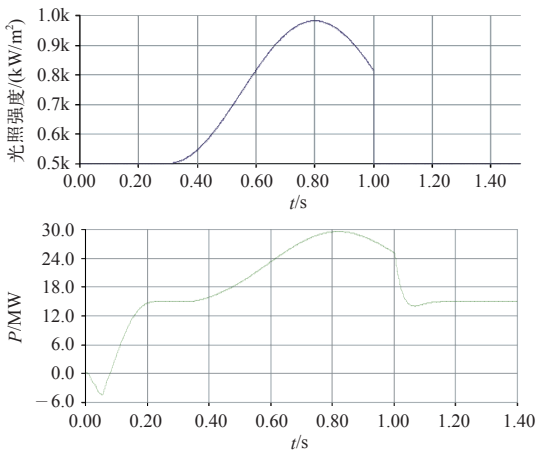


图1 光伏电站输出特性

热过载能力很低，为了保护元件不被损坏往往限制逆变器的输出电流，这就意味着逆变型并网的分布式电源在电网故障时对故障点短路电流的贡献不可能很大[7]。并网运行的负荷电流远远大于光伏离网运行的负荷电流，并网运行时负荷电流主要由配电网提供，而光伏电源提供的负荷电流相对较小[8]。系统提供的故障电流、负荷电流与加入60 MW光伏后故障电流、负荷电流的对比如图2所示。

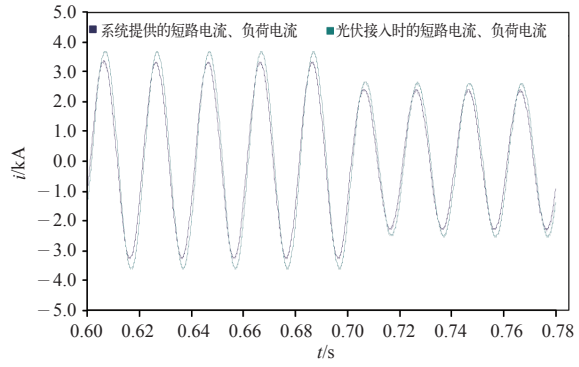


图2 短路电流、负荷电流

光伏接入对系统下游保护的影响

1. 保护整定原则

单电源系统传统配电网的典型保护设计方案通常是主馈线断路器采用电流三段式保护，并配置三相一次重合闸（前加速）装置，其中电流速断保护按照躲开本线路末端的最大短路电流来整定，不能保护线路全长，即

$$I_{set}^{1}=K_{rel}^{1}I_{k.C.max} \tag{1}$$

保护的最小范围计算式为

$$I_{set}^{1}=\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{E_{\partial}}{Z_{S.max}+z_1L_{min}} \tag{2}$$

则

$$L_{min}=\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{E_{\partial}}{I_{set}^{1}}-Z_{S.max} \tag{3}$$

限时电流速断保护是按照躲开下级各相邻元件电流速断保护的最大动作范围来整定的，即

$$I_{set}^{2}=K_{rel}^{2}I_{set}^{1} \tag{4}$$

灵敏系数的计算式为

$$K_{sen}=\frac{I_{k.B.min}}{I_{set}^{2}} \tag{5}$$

而过电流保护则是按照躲开最大负荷电流来整定，不仅可以保护本线路的全长，也可以保护相邻线路的全长，起到后备保护的作用，即

$$I_{set}^{3}=\frac{K_{rel}^{3}K_{SS}I_{L.max}}{K_{re}} \tag{6}$$

要求对本条线路及下一条线路或设备相间故障都有反应能力，反应能力用灵敏系数衡量。本条线路后备保护（近后备）的灵敏系数规定为

$$K_{sen(近)}=\frac{I_{d.min}}{I_{op}^{3}} \tag{7}$$

式中，K_{rel}^{1}、K_{rel}^{2}和K_{rel}^{3}为可靠系数，K_{rel}^{1}一般取1.2～1.3，K_{rel}^{2}一般取1.1～1.2，K_{rel}^{3}一般取1.15～1.25；$I_{K.D.max}$为D母线上短路时的最大短路流，K_{ss}为自起动系数，数值大于1，应由网络具体接线和负荷性质确定；K_{re}为电流继电器的返回系数，一般采用0.85～0.95；E_{∂}为系统等效电源的相电动势；L_{min}为电流速断保护的最小保护范围；z_1为线路单位长度的正序阻抗；$Z_{S.max}$为保护安装处到系统等效电源之间的最大等效阻抗；$I_{d.min}$为被保护线路末端两相短路时流过限时电流速断保护的最小短路电流；I_{op}^{3}为定时限过电流保护的动作电流。

2. 短路电流

根据某一光伏电站接入系统实际情况，其配电网示意图如图3所示。

图3为一个含光伏电站的35 kV配电网，当光伏电源下游发生故障时，即k_2发生三相接地短路

中国知网 https://www.cnki.net

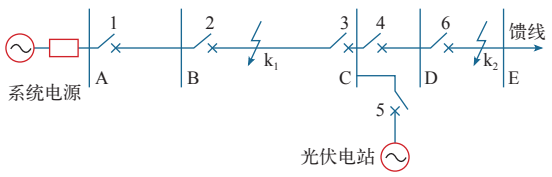


图3 含光伏的配电网示意图

时，其等效电路图如图4所示。

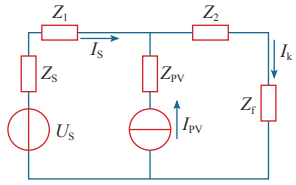


图4 含光伏配电网等效电路图

图4中，Z_1为母线A到光伏电站处线路的阻抗，Z_2为光伏电站到k_2故障处线路的阻抗；U_S为系统的电压；Z_S为系统的阻抗值；Z_f为接地阻抗；I_{PV}为光伏电源的电流；Z_{PV}为光伏电源的阻抗；I_k为短路电流。

$$I_S + I_{pv} = I_k \tag{8}$$

$$Z_S I_S + Z_1 I_S + Z_2 I_k + Z_f I_k = U_S \tag{9}$$

$$I_S = \frac{U_S - I_{PV}(Z_2 + Z_f)}{Z_S + Z_1 + Z_2 + Z_f} \tag{10}$$

短路电流为

$$I_k = \frac{U_S + I_{PV}(Z_S + Z_1)}{Z_S + Z_1 + Z_2 + Z_f} \tag{11}$$

当k_2处发生短路时，光伏电源容量较小时，由于光伏电站助增电流的作用，使故障点处的短路电流增大，保护6的灵敏度得到提高，保护4的最小保护范围增加。

对于含光伏的配电网，保护背侧系统可以等效为一个变化的电压源和一个阻抗串联的形式[9]，如图5所示。

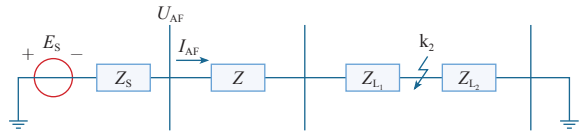


图5 等效故障状态图

系统等效电势E_S的计算式为

$$E_S = U_{AF} + I_{AF} Z_S \tag{12}$$

式中，U_{AF}、I_{AF}分别为保护安装处故障时的电压和电流；Z_S为保护背侧系统等效阻抗。

结合式（3），可得出

$$L_{min} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{AF} \frac{(Z_{AF} + Z_S - Z_{Smax} \frac{I^1_{set}}{I^1_{AF}})}{I^1_{set}} \tag{13}$$

由式（13）可知，最小保护范围与保护安装处的故障电流、保护背侧系统等效阻抗有关。当系统等效阻抗不变或变化较小时，故障电流越大，最小保护范围越大。

光伏并网短路、负荷电流仿真分析

1. 并网光伏对下游电流保护的影响

结合图3，以PSCAD/EMTDC为平台，搭建仿真模型，针对不同容量的光伏电站，仿真记录故障时保护4、保护6处的相电压和相电流的采样数据和无故障时保护4、保护6处的负荷电流采样数据，当光伏电站接入之前，根据式（1）、式（4）和式（6），配电网保护4与保护6的电流速断保护整定值分别为6.456 kA、3.24 kA，保护4的限时电流速断保护的整定值为3.89 kA，保护4的定时限过电流保护的整定值为3.41 kA。含不同容量光伏电站的配电网发生三相短路时，流过保护4和保护6的电流如表1所示。图6～图9为不同位置发生故障的短路电流与负荷电流曲线。

表1 不同位置发生故障的短路电流与负荷电流

光伏电源容量/MW	CD线路末端短路电流/kA	CD线路末端负荷电流/kA	DE线路末端短路电流/kA	DE线路33%处短路电流/kA
0	5.38	2.323	2.76	3.8
30	5.81	2.48	2.89	4.01
60	6.01	2.56	2.98	4.12

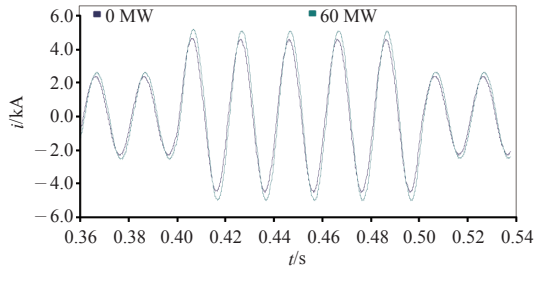


图6 CD线路末端短路故障时电流

中国知网 https://www.cnki.net

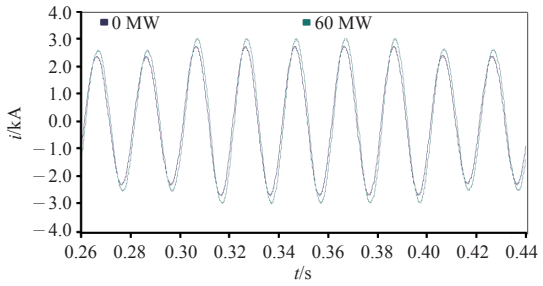


图7　DE线路末端短路故障时电流

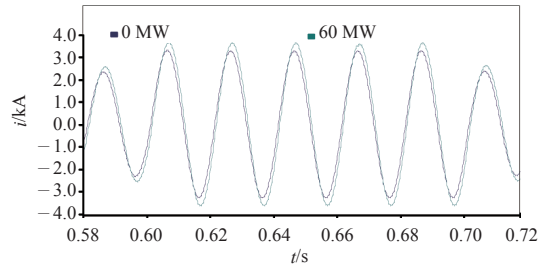


图8　DE线路33%处短路故障时电流

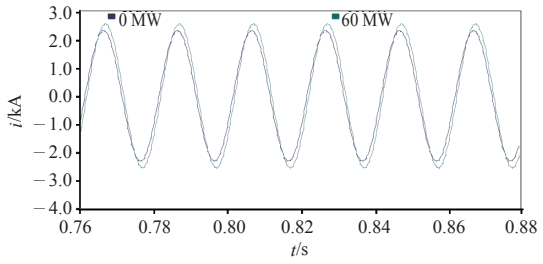


图9　CD线路末端负荷电流

2. 并网光伏短路、负荷电流仿真结果分析

（1）并网光伏对保护动作行为的影响

从图6～图9可以看出，随着光伏容量的增大，不管是负荷电流还是故障电流，都呈现出一定的增大趋势，与无光伏时比较，60 MW光伏时线路末端负荷电流、线路末端故障电流和DE线路33%处故障时的故障电流都有明显的增长。由于光伏逆变器的限流作用，故障电流不可能一直增加，当故障电流增加到极限值，再增大光伏容量时，故障电流将不会出现明显的变化。按常规的电流保护整定值计算，当光伏电源容量增加到60 MW，CD线路33%处发生短路故障时，$I_{DE}=4.12$ kA，由此可得$I_{setCD}=6.456$ kA，则$I_{setCD}<I_{DE}$。

此时故障电流小于电流速断保护4的整定值，所以故障将仍由DE线路上的保护6动作切除，不会导致保护4误动，使保护失去选择性。

（2）并网光伏对最小保护范围的影响

随着光伏容量的增大，当发生最小运行方式下的两相短路时，保护4处的保护范围变化情况如表2所示。

表2　不同光伏容量保护4的最小保护范围

光伏电源容量/MW	CD线路保护4处相间短路故障电流/kA	保护4电流速断保护的最小保护范围（%）
0	5.355	44
15	5.450	54
20	5.485	55
25	5.517	56
30	5.548	57
60	5.734	65

根据式（13）可知，当光伏容量逐渐增大时，保护安装处的相间短路电流增大，最小保护范围增加，可知当光伏容量增大时，保护4处的短路电流逐渐增大，最小保护范围也会得到相应提高。

（3）并网光伏对保护灵敏性的影响

根据电流三段式保护方法整定，限时电流速断保护、定时限过电流保护的灵敏性随光伏容量的变化如表3所示。

表3　不同光伏容量保护4的灵敏性

光伏电源容量/MW	限时电流速断保护4处的灵敏性	定时限过电流保护4处的灵敏性
0	1.501	1.57
15	1.516	1.59
20	1.542	1.61
25	1.554	1.62
30	1.601	1.63
60	1.651	1.68

由表2、表3分析可知，光伏电源容量从0 MW到60 MW逐渐增大时，相间短路电流增大，限时电流速断保护、定时限过电流保护4处的灵敏性提高。

按常规的电流速断保护整定值计算，当光伏电源容量从零开始逐渐增大时，CD、DE线路上的负荷电流、短路电流逐渐增大，当光伏容量小于60 MW时，保护的灵敏性和最小保护范围均随着光伏容量的增加而逐渐增大，当光伏容量增加到60 MW，线路DE发生短路故障时，保护4处测得的电流值小于整定值，不会导致保护4发生误动。

中国知网　https://www.cnki.net

结束语

基于光伏电站并网的运行特性，详细分析了不同容量光伏电源接入35 kV配电网对传统的配电线路下游继电保护产生的影响，经过理论推导和仿真分析可知，随着光伏容量的不断增加，当光伏电源下游发生短路故障时，光伏电源下游线路短路电流、负荷电流增大，改变了最小保护范围，影响了保护的灵敏性。

参考文献

[1] 石振刚，王晓蔚，赵书强．并网光伏发电系统对配电网线路保护的影响 [J]．华东电力，2010，38 (9)：1405-1408．

[2] 李斌，袁越．光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策 [J]．电力自动化设备，2013，33 (4)：12-17．

[3] 刘健，林涛，同向前，等．分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析 [J]．电网技术，2013，37 (8)：2080-2085．

[4] 杨国生，李欣，周泽昕．风电场接入对配电网继电保护的影响与对策 [J]．电网技术，2009，33 (11)：87-91．

[5] 高研，毕锐，杨为，等．分布式发电对配电网继电保护的影响 [J]．电网与清洁能源，2009，25 (4)：20-23．

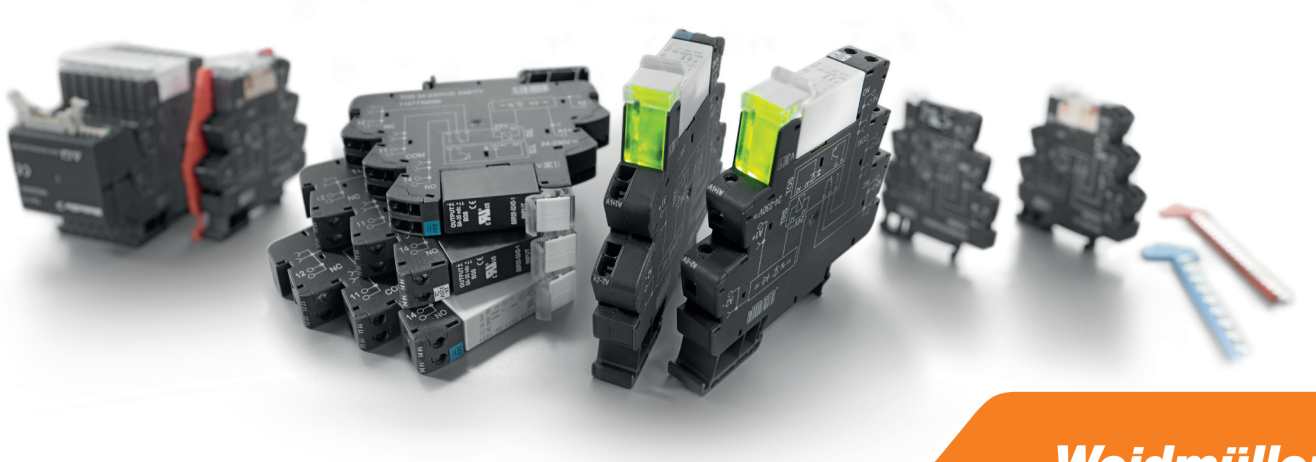
[6] 黄伟，雷金勇，夏翔，等．分布式电源对配电网相间短路保护的影响 [J]．电力系统自动化，2008，32 (1)：93-97．

[7] 冯希科，郜能灵，宋凯．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．

[8] 杨文华．并网光伏电站短路特性分析与计算 [J]．宁夏电力，2011 (6)：5-7．

[9] 李凤婷，李智才．含异步机风电场的配电网故障特性及其保护分析 [J]．电网技术，2013，37 (4)：981-986．

（收稿日期：2015－06－17）EA



Weidmüller

魏德米勒TERM系列继电器
—设计紧凑的一体化解决方案

魏德米勒TERM系列继电器解决方案，为满足电力行业客户实际应用中的高标准需求：
- 超薄的继电器和固态继电器，宽度仅为6.4毫米或12.8毫米，占用更少的导轨空间
- 可以选择螺钉或弹片两种接线技术
- 在各种设备或者工厂改造中，24V~230VUC的宽电压输入始终能满足客户的自动化应用需求
- 经过优化的"HC"和"HCP"型号1常开继电器，提供独特和长使用寿命的方案，可用于大冲击电流负载
- 5层横联，易于操作，简单灵活。不同宽度，接线方式的继电器都可以用一根横联件直接横联

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn

扫一扫，关注魏德米勒官方微信

Let's connect.

中国知网 https://www.cnki.net