

光伏系统对配电网电流保护影响分析

分布式光伏电源接入配电网后改变了原有网络结构，引起了短路电流方向及大小的变化，从而造成了保护误动作或拒动作等问题。研究了光伏并网发电系统的暂态模型，并以PSCAD/EMTDC为仿真平台，搭建了含光伏电源的配电网算例模型，在光伏不同接入位置和接入容量情况下，通过拟合光伏电源接入容量与短路电流的关系曲线，分析了光伏电源助增电流或分流作用对短路电流及保护的影响。分析结果表明配电网中接入光伏电源后，对其下游的电流保护的灵敏度和选择性产生影响，同时可能造成上游电流保护范围缩短，导致Ⅱ段保护拒动作。

刘清贵 晁 勤 李育强 希 望 任 娟/新疆大学电气工程学院



刘清贵/硕士研究生

光伏发电作为一种可再生的绿色能源，近年来在世界范围内一直保持着快速发展的势头，我国的光伏产业也紧随其后快速地发展。根据国家能源局公布的资料统计，截止2013年底我国光伏装机容量达到11.18 GW，而其中分布式光伏电站容量达到5.98 GW，占到了53.4%。大量的分布式光伏电源接入配电网后，使原有单侧电源供电的放射状配电网供电结构发生变化，从而对原有配电网的运行控制及其供电可靠性造成影响^[1]。尤其在线路发生故障时，系统电源和光伏电源可能同时向短路点提供短路电流，这样将影响继电保护的正常运行，使保护装置拒动作或误动作。光伏系统并网后，给电网带来的问题已引起了大家的广泛关注^[2-3]。

目前，光伏发电的研究以光伏发电系统本身以及对外部电网的影响为主。文献[4-6]讨论了光伏电池和光伏发电系

统的动态模型以及并网光伏电站整体仿真模型；文献[7-9]分析了光伏发电系统的并网逆变器结构及其控制策略；文献[10]分析了光伏发电系统的并网特性；文献[11-12]研究了光伏并网对电网供电可靠性的影响。随着光伏接入配电网容量的增加，其对配电网保护有着重要意义。

本文首先分析了光伏并网发电系统的暂态模型，并在PSCAD/EMTDC软件平台上搭建了含光伏的电力系统仿真模型，在光伏不同接入位置和接入容量情况下，通过拟合光伏电源接入容量与短路电流的关系曲线，分析了光伏对配电网电流保护的影响。

并网光伏电站建模

光伏发电系统由光伏阵列、具有最大功率跟踪功能的逆变装置及滤波环节、变压器和控制系统组成，如图1所示。

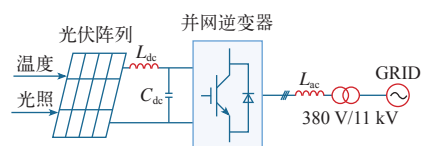


图1 三相光伏发电系统

1. 光伏阵列模型

对于实际系统的光伏阵列，由 N 个光伏电池组件串联和并联组成，其输出电流 I_{PV} 与端电压 U_{PV} 的表达式为^[13]

$$\begin{cases} I_{PV} = N_p N_{p1} I_L - N_p N_{p1} I_0 \left[e^{\frac{qV_{PV}}{nKT N_{s1} N_s}} - 1 \right] \\ V_{PV} = \frac{N_{s1} N_s nKT}{q} \ln \left[\frac{N_p N_{p1} I_L - I_{PV}}{N_p N_{p1} I_0} + 1 \right] \\ P_{PV} = \max(I_{PV} V_{PV})|_{I_t, T} \end{cases} \quad (1)$$

国家自然科学基金项目 (51367017, 51367016)。

关键词/Keywords

光伏发电 ·
配电网 ·
继电保护 ·
短路电流 ·

式中, N_p 和 N_{p1} 分别为光伏阵列和光伏组件的并联数; I_0 为饱和电流; n 为比例因子, 也称为二极管品质因子; q 为充电电荷量, 通常取 $1.60 \times 10^{-19} \text{C}$; k 为玻尔兹曼常数, 通常取 1.38×10^{-23} ; T 为开式温度, 标准测量温度下为298 K; N_s 和 N_{s1} 分别为光伏阵列及光伏组件的串联数; P_{pv} 为具有最大功率跟踪性能的光伏发电站光伏阵列输出直流功率; I_r 为辐射率, 即辐照度与标准辐照度 ($1\,000 \text{ W/m}^2$) 的比值。

在任意辐照度和组件温度下，光伏阵列输出电流和输出电压呈非线性关系。

2. 光伏逆变器及发电系统控制策略

光伏阵列输出直流形式的电能，由并网逆变器逆变为交流，通过并网逆变器的矢量控制来实现并网有功、无功的解耦控制，同时实现不同的并网功率因数的控制。

本文所采用的逆变器控制策略是基于 $d-q$ 坐标的矢量解耦电流控制方式。控制系统由直流电压外环和有功、无功电流内环构成,如图2所示。逆变器外环电压控制部分添加最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT),以日照 S 和温度 T 计算得到的最大功率点运行电压值作为外环电压的参考值。

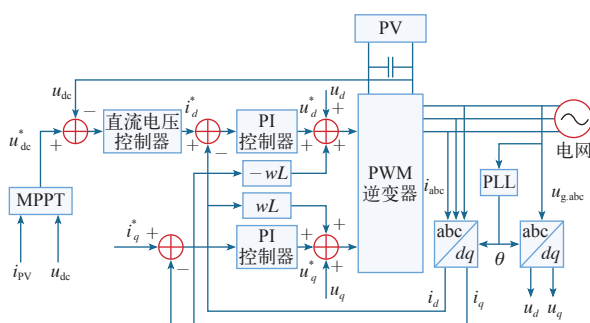


图2 光伏并网系统控制结构

根据瞬时功率理论^[14], 逆变系统的有功功率 p 、无功功率 q 分别为

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) \\ q = \frac{3}{2}(e_d i_q + e_q i_d) \end{cases} \quad (2)$$

当电网电压定向时, $e_a=0$, 从而式 (2) 可以

简化为

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2}e_d i_d \\ q = \frac{3}{2}e_d i_q \end{cases} \quad (3)$$

由此, 逆变器输出的有功功率和无功功率可以解耦。当 e_d 保持恒定时, 通过对 i_d 进行控制, 调节逆变器的输出有功功率; 通过控制 i_q , 从而控制逆变器的无功功率。通常设定逆变器输出的功率因数为1, 从而使逆变器功率损耗最小, 同时可以通过设定无功电流环参考电流 $i_q^* = 0$ 来实现。

光伏系统通过逆变器与电网接口,在电网故障期间,国家电网公司关于光伏电站接入电网的技术规范^[15]要求大中型光伏电站保持一定时间不脱网,并为电网稳定性提供支撑。同时要求光伏电站具备一定的过电流能力,在120%倍额定电流下连续可靠工作时间不小于60 s。

由于故障持续时间一般较短,且光伏电站逆变器直流侧配置直流侧保护^[16],使直流侧电压 u_{dc} 在故障期间基本保持不变,因此在光伏低电压穿越运行过程中,通过对电流内环的直接控制来限制短路电流。根据电压跌落幅度对无功电流指令 i_q^* 进行自适应调整,即

$$i_q^* = \begin{cases} 0 & \alpha > 0.9 \\ 2(1-\alpha) & 0.4 \leq \alpha \leq 0.9 \\ 1.2 & \alpha < 0.4 \end{cases} \quad (4)$$

式中,所有量均为标么值; α 为跌落后的电网电压正序幅值。

光伏短路电流特性分析

基于上述光伏逆变器及发电系统的控制策略,以PSCAD/EMTDC为仿真平台建立光伏电磁暂态模型,并以光伏电源接入电网的并网点为考察点,对故障电流进行分析。

光伏发电系统仿真参数如下：额定功率为1.0 MV·A；并网点电压为10.5 kV；额定频率为50 Hz；光照强度 $G = 1\,000\text{ kW/m}^2$ ；环境温度 $T_c = 25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

以光伏出口处发生三相短路故障为例,在 $t=1\text{ s}$ 时刻,光伏出口发生三相短路,仿真得到光伏出

口短路电流如图3所示。

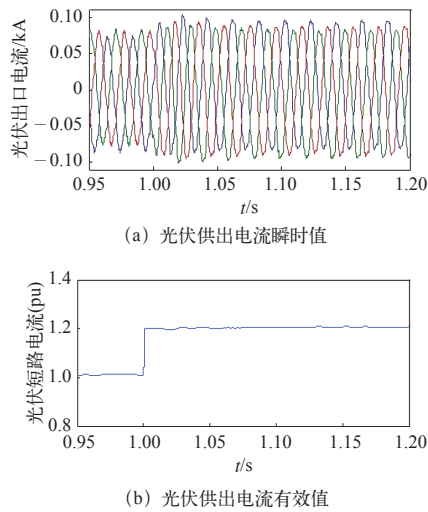


图3 并网点三相短路时光伏的短路电流

由于光伏通过逆变器并网，惯性时间常数很小，光伏输出故障电流中的暂态分量可以忽略，故可直接进入故障稳态运行。电网三相短路后，通过无功指令对电流内环进行直接控制，光伏短路电流维持在1.2（pu）左右。

光伏系统对配电网电流保护影响分析

目前国内配电网系统大多是单侧电源、辐射形网络，线路发生故障时，只有系统侧电源向故障点供电，因此保护装置装设在靠近系统侧的一端。光伏电源接入配电网后将会改变配电网的拓扑结构，同时将影响现有的基于单端电源系统设计的配电系统保护装置正确动作。配电网中通常采用三段式电流保护方案，即电流速断保护、限时电流速断保护和过电流保护。为了简化分析，本文采用电流速断保护和限时电流速断保护构成的两段式电流保护。

典型配电网结构如图4所示。假设光伏接入10.5 kV配电网，并将10.5 kV变电站以上的电网等

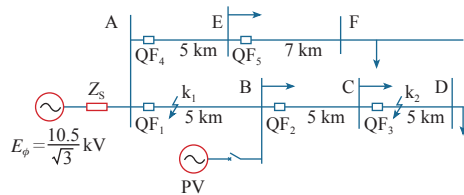


图4 光伏接入配电网对保护影响仿真算例

效为一个电压源。系统的基准容量 $S_B = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ，基准电压 $U_B = 10.5 \text{ kV}$ ，最小运行方式下系统阻抗 $Z_{s,\min} = j0.91 \Omega$ ，最大运行方式下系统阻抗 $Z_{s,\max} = j1.16 \Omega$ ，线路阻抗为 $0.27 + j0.393 \Omega/\text{km}$ 。

无光伏接入时，根据继电保护整定原则^[17]，配电网按上面参数计算得到的各电流保护整定值如表1所示。具体包括电流整定值 I_{set} 、动作的时间 t_{op} ，其中电流速断保护可靠系数取1.20，限时电流速断保护可靠系数取1.10。

表1 无光伏接入时，线路各电流保护整定值

电流保护	电流整定值 I_{set}/kA	动作时间 t_{op}/s
QF ₁ （Ⅰ）	2.290	0
QF ₂ （Ⅰ）	1.313	0
QF ₃ （Ⅰ）	0.918	0
QF ₁ （Ⅱ）	1.443	0.5
QF ₂ （Ⅱ）	1.010	0.5
QF ₃ （Ⅱ）	—	0.5

1. 光伏接在故障点上游时对电流保护的影响分析

当光伏电源下游发生故障时，由于其对故障电流有助增作用，因此将影响接入点附近的保护正确动作。

当系统最大运行方式下线路CD首端 k_2 点发生三相短路故障时（见图4），在不同光伏接入容量下，流过各线路AB、BC和CD电流保护的故障电流如表2所示。

表2 k_2 点短路，接入容量变化时的短路电流

光伏接入容量/MW	短路电流/kA		
	QF ₁	QF ₂	QF ₃
0	1.066	1.066	1.066
1	1.036	1.134	1.134
3	0.972	1.246	1.246
5	0.903	1.388	1.388
8	0.896	1.562	1.562

对于保护QF₁，由于受光伏电源分流作用影响，故障电流随光伏接入容量增大而减小，保护灵敏度减小；对于保护QF₂，由于受光伏电源助增电流影响，故障电流随光伏接入容量增大而增大，线路电流 I_{BC} 与光伏注入功率 P_{PV} 的关系曲线如图5所示，当光伏容量达到5 MW时，流过保护QF₃的故

障电流已经大于其电流速断 I 段整定值 (1.388 kA)，保护将误动作，即此时保护 QF₂、QF₃ 都将瞬时动作切除线路 CD，从而失去选择性；对于保护 QF₃，由于受光伏助增电流影响，故障电流随光伏接入容量增大而增大，同时增大了保护的灵敏度；对于保护 QF₄，由于不流过光伏电流，因此其动作不受影响。

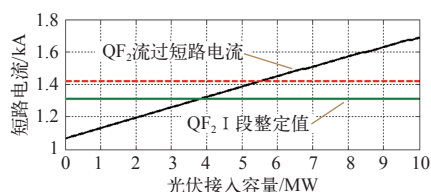


图5 QF₂短路电流与光伏接入容量的关系曲线

一般情况下，电流速断保护的可靠系数 $K_{rel}^I = 1.2 \sim 1.3$ ，随着可靠系数的增大，保护 I 段的整定值增大；有可能避免保护 QF₂ 的 I 段在下级线路发生故障时误动作。当光伏容量为 5 MW，系统最大运行方式下线路 DE 前端 k₂ 点发生三相短路故障时，可靠系数 K_{rel}^I 改变，流过保护 QF₂ 的故障电流如表 3 所示。

表3 k₂点短路，可靠系数变化时流过保护QF₂的短路电流

K_{rel}^I	短路电流/kA	I 段整定值/kA
1.20	1.388	1.313
1.25	1.388	1.367
1.30	1.388	1.421

当光伏容量为 5 MW，取 $K_{rel}^I = 1.25$ 时，保护 QF₂ 不再误动作。根据光伏电源容量大小，合理调整保护 I 段的可靠系数，可能避免保护 QF₂ 的 I 段在下级线路发生故障时误动作。

2. 光伏接在故障点下游时对电流保护的影响分析

当光伏电源上游发生故障时，由于其对故障电流有分流作用，因此将影响接入点附近的保护正确动作。

当系统最小运行方式下线路 BC 后端 k₁ 点发生两相短路故障时（见图 4），在不同光伏接入容量下，流过保护 QF₁ 的故障电流如表 4 所示。

保护 QF₁ 受光伏分流作用影响，流过保护的故障相电流减小，可能导致保护 QF₁ 的 II 段拒动

表4 k₁点短路，接入容量变化时流过保护QF₁的短路电流

光伏接入容量 /MW	故障相短路电流 /kA	非故障相短路电流 /kA	II 段整定值 /kA
0	1.563	0.132	1.443
1	1.520	0.208	1.443
3	1.467	0.411	1.443
5	1.441	0.559	1.443
8	1.427	0.753	1.443

作。故障相电流与光伏容量的关系曲线如图 6 所示，随着光伏容量的增大，保护 QF₁ 流过的故障电流先减小后缓慢增大。当光伏接入容量为 8 MW 时，流过保护 QF₁ 的故障电流已经小于其 II 段整定值 (1.427 kA)，保护 QF₁ 将拒动作。非故障相不会提供大的短路电流。

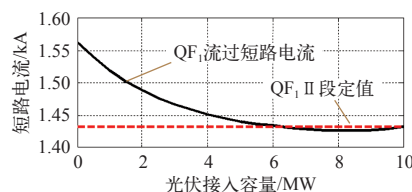


图6 QF₁短路电流与光伏接入容量的关系曲线

一般情况下，限时电流速断保护的可靠系数 $K_{rel}^{II} = 1.1 \sim 1.2$ ，随着可靠系数的增大，保护 II 段整定值增大；当光伏接入容量为 5 MW，可靠系数 K_{rel}^{II} 改变时，流过保护 QF₁ 故障电流如表 5 所示。

表5 k₁点短路，可靠系数变化时流过保护QF₁的短路电流

K_{rel}^{II}	短路电流/kA	II 段整定值/kA
1.10	1.441	1.443
1.15	1.441	1.509
1.20	1.441	1.575

随着可靠系数的增大，保护 II 段整定值增大，同时也增大了保护 II 段的拒动作范围；当 $K_{rel}^{II} = 1.15$ 时，5 MW 光伏电源接入会导致保护 QF₁ 的拒动作。

结束语

本文研究了光伏电源接入配电网对配电网电流保护的影响，采用 PSCAD/EMTDC 平台搭建了含光伏电源的配电网仿真模型，分析了光伏接入不同容量、不同位置时对配电网电流保护的影

响。通过仿真试验,得出以下结论:

1) 当光伏接入位置在故障点上游时,光伏接入容量增大,由于光伏的助增作用,将增大故障点所在线路电流保护 I 段的保护范围,但可能导致故障点所在线路的相邻线路电流速断保护 I 段超越;同时造成位于上游电流保护的短路电流变小,使保护范围变小,降低了灵敏性。

2) 当光伏接入位置在故障点下游时,光伏接入容量增大,由于光伏的分流作用,造成位于上游电流保护的短路电流变小,可能导致故障点所在线路电流保护的 II 段拒动作。

3) 线路电流保护误动作、拒动作范围与可靠系数、光伏接入容量等因素有关。

针对上述光伏电源对电流保护的影响,可以限制光伏接入的容量;或采用自适应电流保护装置,以提高供电可靠性;还可以在发生故障时使光伏快速地从电网中解列。

参考文献

- [1] 孙鸣,余娟,邓博.分布式发电对配电网线路保护影响的分析[J].电网技术,2009(8):104-107.
- [2] 刘伟,彭冬,卜广全,等.光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述[J].电网技术,2009(19):1-6.
- [3] 郑建辉,王硕,林焱,等.兆瓦级光伏电站并网对配电网影响的仿真分析[J].电气应用,2012(21):44-49.
- [4] 李乃永,梁军,赵义术.并网光伏电站的动态建模与稳定性研究[J].中国电机工程学报,2011(10):12-18.
- [5] 李晶,许洪华,赵海翔,等.并网光伏电站动态建模及仿真分析[J].电力系统自动化,2008(24):83-87.
- [6] 焦阳,宋强,刘文华.光伏电池实用仿真模型及光伏发电系统仿真[J].电网技术,2010(11):204-208.
- [7] 沈欣炜,郑竞宏,朱守真,等.光伏并网逆变器控制参数的dq轴解耦辨识策略[J].电力系统自动化,2014(4):38-43.
- [8] 刘波,杨旭,孔繁麟,等.三相光伏并网逆变器控制策略[J].电工技术学报,2012(8):64-70.
- [9] 袁晓玲,宋鹏飞,范发靖,等.光伏逆变器低电压穿越控制策略[J].电力电子技术,2013(3):67-69.
- [10] 杨德州,王利平,张军,等.大型分布式电源模型化研究及其并网特性分析[J].电力系统保护与控制,2010(18):104-110.
- [11] 王一波,伍春生,廖华,等.大型并网光伏发电系统稳态模型与潮流分析[J].清华大学学报:自然科学版,2009(8):1093-1097.
- [12] 赵勇帅,赵渊,芦晶晶,等.光伏发电系统可靠性建模及对配网可靠性的影响[J].华东电力,2013(9):1783-1789.
- [13] Walker Geoff. Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model[J]. Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, 2001, 21(1):49-55.
- [14] 任天鸿,袁铁江,晁勤,等.并网光伏发电系统动态特性的对比分析[J].可再生能源,2012(10):15-18.
- [15] 国家电网公司. Q/GDW 617—2011 光伏电站接入电网技术规范[M].北京:中国电力出版社,2011:5.
- [16] 唐彬伟,袁铁江,晁勤,等.基于直流侧保护的并网光伏发电系统低电压运行特性分析[J].华东电力,2013(2):328-332.
- [17] 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.

(收稿日期:2014-05-19) **EA**