

# Effects of Grid-Connected Photovoltaic System on Distribution Network Protection and Its Countermeasures\*

Jie Chen, Jijiang Song

School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo

Email: babudouemily@126.com

Received: Oct. 28th, 2011; revised: Nov. 30th, 2011; accepted: Dec. 3rd, 2011.

**Abstract:** With the energy sources and environmental problems becoming increasingly serious, photovoltaic power generation as a strategic new industry, has been rapid development. As the cost of photovoltaic power generation is reduced, grid-connected photovoltaic system has gradually become the mainstream of photovoltaic industry. To ensure grid security and stability, the effects of grid-connected photovoltaic system on the traditional current protection and automatic reclosing device are analyzed in this paper. The results of the PSCAD simulation prove that the different capacity of grid-connected photovoltaic systems affect the line fault current. The protection scheme with the wide-area measurement system for basic and the relevant improvements are put forward to reduce or even eliminate these adverse effects.

**Keywords:** Photovoltaic; Protection; Automatic Reclosing; Distribution Network

## 光伏发电并网对配电网保护的影响及对策\*

陈 洁, 宋吉江

山东理工大学电气与电子工程学院, 淄博

Email: babudouemily@126.com

收稿日期: 2011年10月28日; 修回日期: 2011年11月30日; 录用日期: 2011年12月3日

**摘 要:** 随着能源和环境问题越来越突出, 光伏发电作为一种战略性新兴产业, 得到了快速发展。由于光伏发电的成本不断降低, 并网型光伏系统逐步成为光伏产业的主流。为了保证电网安全稳定运行, 本文分析了光伏电源并网对配电网原有的电流保护和自动重合闸装置所造成的影响。通过 PSCAD 仿真验证了不同容量的光伏系统并网对线路故障电流的影响。为了减少甚至消除这些不利影响, 提出了以广域测量系统为基础的保护方案以及相关的改进措施。

**关键词:** 光伏; 保护; 重合闸; 配电网

### 1. 引言

不仅因保护生态环境对清洁能源的需求增加, 而且为了解决现实能源供应问题, 发展新能源与可再生能源均有重大的战略意义。因光伏发电(Photovoltaic, 简称 PV)具有无污染, 可再生以及发电系统机动灵活等优势而被公认为技术含量高、最有发展前途的技术之一<sup>[1]</sup>。它的工作形式大体可分为独立和并网两种。

作为当今世界光伏发电的必然趋势, 光伏发电并网可起到节约能源, 削峰填谷, 降低能耗、增加电网经济性等作用。但数目较多或容量较大的光伏电源被引入配电网后, 不仅改变了网络构成和潮流分布, 还会引起故障电流水平发生变化, 从而影响其继电保护和自动装置的正常运行。原有的配电网保护和重合闸配置必须根据接入的光伏电源的容量大小和位置而进行相应调整和改变<sup>[2]</sup>, 否则 PV 会使电网中的故障无法及时、准确地被切除, 影响系统稳定运行、对供配

\*一级学科研究经费资助项目(4081-103128)。

电设备和 PV 造成损坏。为了适应大规模、高容量的光伏发电系统接入电网运行，同时保证电网的安全稳定，研究光伏发电并网对电网产生的影响<sup>[3]</sup>，特别是对其保护装置的影响变得尤为重要。

### 2. 配电网的保护配置

目前我国中低压配电网主要是单电源辐射网络，其电流、功率的方向是恒定的，因此其保护配置也是基于单端电源系统设计的。

对于非终端线路，采用三段式电流保护与其它保护相配合。对于无须与相邻线路配合的终端线路，即直接向用户供电的馈线，为简化保护配置，一般采用瞬时电流速断保护加定时限过电流保护。瞬时电流速断保护按馈线末端短路有足够灵敏度原则整定以保护全线。对于非全电缆线路，配置三相一次重合闸，以保证在其发生瞬时故障时，快速恢复供电<sup>[4]</sup>。而电缆线路的故障大多是永久性故障，因此自动重合闸装置对电缆线路不适用。

### 3. 光伏发电并网对于保护的影响

根据典型配电网的保护配置，设定馈线采用瞬时电流速断和定时限过电流保护，并配置重合闸加速装置，即当馈线上发生故障时，靠近系统电源侧的电流速断保护先无选择性地瞬时动作跳闸，然后启动重合闸装置进行重合，若重合到永久故障时则由线路保护有选择地切除故障<sup>[5]</sup>。这样可避免瞬时性故障发展为永久性故障，从而能够提高重合的成功率。

依据以上电网保护配置情况来分析光伏发电系统并网对其影响。

#### 3.1. 相邻线路故障时的情况

如图 1，当 K1 处发生故障时，系统侧保护将动作于跳闸以隔离故障，如果跳闸后 PV 仍与电网联接，则重合闸动作时将有可能造成非同期合闸。这会对系统、PV 电源等产生严重冲击和破坏。

当相邻馈线 K2 处故障时，PV 电源和系统电源依旧保持电气联系，则 PV 有可能不会解列而继续并网运行。此时 PV 将向故障点提供反向短路电流，则保护 1、2 都将感受到此故障电流。由于 AC 段线路配置的电流保护并不具有识别故障方向的能力，如果该电

流足够大，将引起保护误动作跳闸。这可能使得 PV 和下游的负荷形成孤岛运行。如果孤岛平衡则 PV 将继续运行，减少了停电范围；如若岛内不平衡则 PV 将退出运行。

当发生的是瞬时性故障时，由重合闸进行重合，线路恢复正常运行。若重合闸动作于永久性故障时，将闭锁故障线路的电流速断保护，由定时限过电流保护有选择性地切除<sup>[5]</sup>。但是当故障发生在近母线处，保护 4 的过电流保护动作时限可能比保护 1 或保护 2 的过流保护时限更长，这样就会造成 QF1 或 QF2 先于 QF4 动作跳闸，切断了非故障线路的正常供电。

当发生 K2 故障时，流过保护 4 的故障电流为系统和 PV 共同提供的，其值大于 PV 并入配网前的故障电流，这样可能使保护 4 的保护范围延伸到下一段线路，无法保证选择性。若故障线路为终端线，则 PV 提供的助增电流的影响是有利的，使保护更加灵敏。

#### 3.2. 本线路故障时的情况

如图 2 所示，根据重合闸前加速原理，自动重合闸装置(Automatic Reclosing 简称 AR)安装在主干线的首段。有两个光伏发电系统分别在配电网的 B 处和 C 处接入。

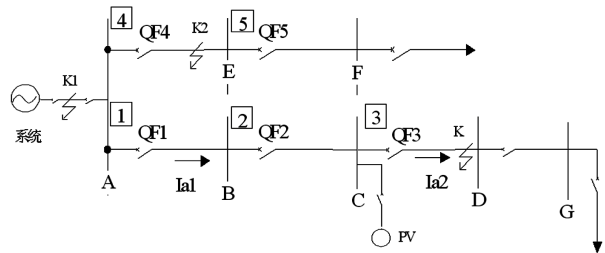


Figure 1. The distribution network with photovoltaic system  
图 1. 有 PV 电源并入的配电网

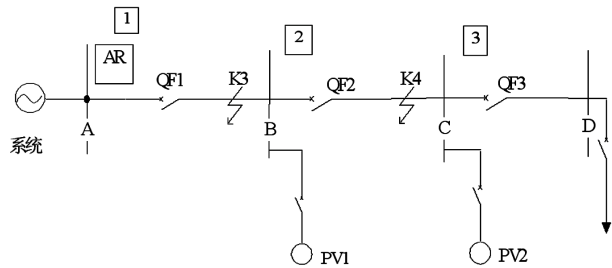


Figure 2. The distribution network with multiple photovoltaic systems  
图 2. 有多个 PV 电源并入的配电网

1) 若 K3 故障发生时, 首先应由系统侧保护 1 处的电流速断保护动作切除故障, 然后由 AR 进行合闸以恢复供电, 若故障为永久性时, 应由保护 1 的过电流保护动作。此时流经保护 1 的故障电流仅由系统电源提供, 与 PV 并入前的大小一样, 保护动作情况不受影响。而对于保护 2 而言, PV2 将向保护 2 提供反向故障电流, 有可能引起保护误动。

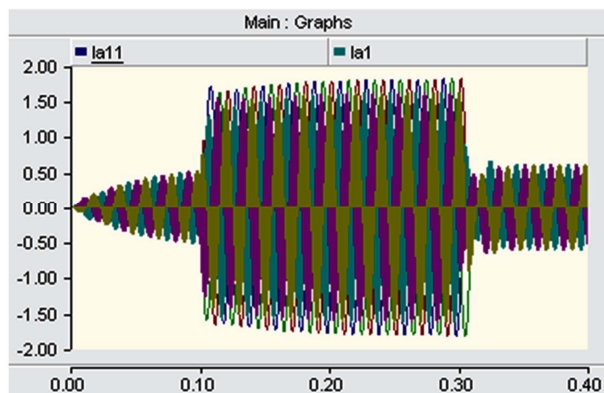
2) 当 K4 故障发生时, 理由由保护 1 的电流速断保护快速动作跳闸, 然后 AR 动作, 若重合于永久性故障时, 由保护 2 的过流保护动作跳闸以切除故障。由于 PV1 的汲出作用, 保护 1 所检测到的故障电流将降低, 保护灵敏度降低, 甚至会拒动。而保护 2 由于 PV1 的助增作用而使得所感受到的故障电流增大, 保护可靠性增加但有可能使保护范围过大。

### 3.3. 仿真验证

依据图 3, 在 PSCAD 中建立配电网仿真模型。取系统的基准容量为 100 MVA, 基准电压取 10.5 KV。光伏电源的容量设为 50 MVA, 由 C 处接入配网。设定 CD 线路末端在仿真运行后 0.1 s 时发生三相短路, 持续时间为 0.2 s, 将此时测得的电流  $I_{a1}$ 、 $I_{a2}$  与未接入 PV 电源而发生故障时的电流  $I_{a11}$ 、 $I_{a21}$  的波形仿真图分别重叠对比如下图 3, 4。

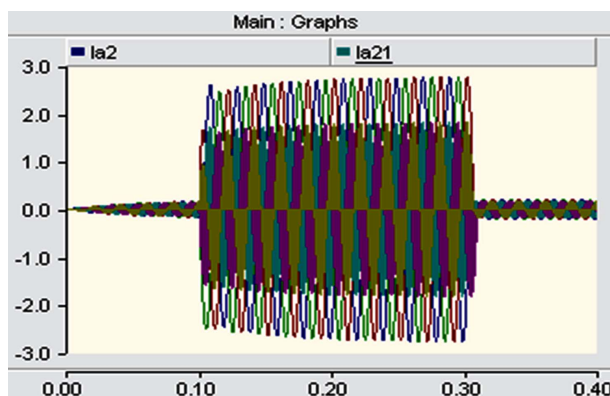
当接入配网的光伏电源容量改为 5MVA 时, 此时测得线路上的电流为  $I_{a12}$ 、 $I_{a22}$ , 波形对比如图 5, 6 所示。

以上仿真结果得出结论如下。



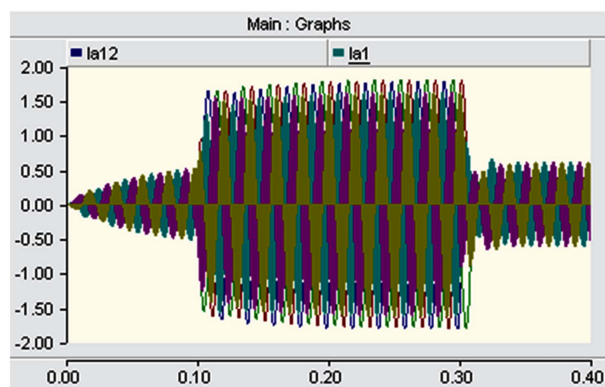
(1)  $I_{a11}$  用曲线表示 (2)  $I_{a1}$  用填充表示

Figure 3. The waveform comparison of the current  $I_{a11}$  and  $I_{a1}$   
图 3. 电流  $I_{a11}$  和  $I_{a1}$  波形对比: (1)  $I_{a11}$  用曲线表示, (2)  $I_{a1}$  用填充表示



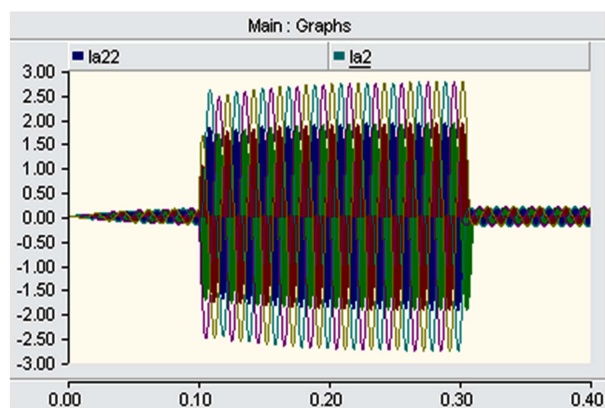
(1)  $I_{a2}$  用曲线表示 (2)  $I_{a21}$  用填充表示

Figure 4. The waveform comparison of the current  $I_{a2}$  and  $I_{a21}$   
图 4. 电流  $I_{a2}$  和  $I_{a21}$  波形对比



(1)  $I_{a12}$  用曲线表示 (2)  $I_{a1}$  用填充表示

Figure 5. The waveform comparison of the current  $I_{a12}$  and  $I_{a1}$   
图 5. 电流  $I_{a12}$  和  $I_{a1}$  波形对比



(1)  $I_{a22}$  用曲线表示 (2)  $I_{a2}$  用填充表示

Figure 6. The waveform comparison of the current  $I_{a22}$  and  $I_{a2}$   
图 6. 电流  $I_{a22}$  和  $I_{a2}$  波形对比

1) 光伏电源接入配电网后, 当其下游线路发生短路故障时, PV 对其上游线路的电流有汲出作用, 对其下游线路的短路电流有助增作用。这样 PV 下游保护

的保护范围可能被延伸,可能使保护失去选择性,造成误动。而 PV 上游保护的灵敏度会被降低,可能造成拒动。

2) 对于同一故障点而言,光伏电源以相同方式接入时。其容量越大,则对原有短路电流的汲出作用或助增作用越大。

#### 4. 针对光伏并网对配电网产生的影响而采用的保护方案

因广域测量系统是以同步相量测量技术为基础,以电力系统动态过程监测、分析和控制为目标的实时监控,具有异地高精度同步相量测量,高速通信和快速反应等技术特点<sup>[6]</sup>,所以基于此形成的方案可获取全网同步动态信息,其高速数据传输<sup>[7]</sup>使得配电网中的多点信息被充分利用,从而让故障定位做到更准确、可靠,将电网整体最优保护设计变成可能。

本保护方案考虑在广域测量系统的基础上,在 PV 上游所有馈线靠系统侧都安装方向电流保护,其中上游第一条馈线装设两段式方向电流保护与重合闸前加速装置。I 段按本线路末端短路时能可靠动作来整定,以保护线路全长,动作时限为 0 s。II 段整定按照躲过最大负荷电流整定。其余上游馈线只安装方向过流保护,保护的时限按照选择时限的阶梯原则。在 PV 上游所有馈线两端都安装断路器,并在上游最后一条馈线的末端加装功率方向继电器。相邻馈线除了首条线路靠系统侧装设两段式电流保护和重合闸前加速,其余馈线以及 PV 下游馈线都只安装定时限过流保护,动作电流按照考虑 PV 的助增作用来整定,也可以直接装设自适应过流保护。另外光伏系统侧要装设低周、低压解列装置和检同期设备,系统侧需装设检无压设备。

故障发生时的保护动作情况为:当本线路故障,先由线路首端的电流保护 I 段无选择地快速跳闸,然后 PV 侧的低周、低压解列装置在测到电压、频率变化后,把 PV 退出配电网。这样处理是因为瞬时故障在失去电源后,需要时间让电弧熄灭和恢复介质绝缘强度<sup>[8]</sup>,以保证重合成功。如果只断开系统侧而 PV 依旧和故障点相联,这样电弧无法熄灭,一旦合闸可能引起故障点重燃产生阶跃电流,继而绝缘击穿,导致故障变成永久性。PV 退出并网至重合闸动作前要保

证有充分时间让故障点的电弧熄灭,以免电弧去游离时间不够,合闸时又重燃。当重合闸动作以恢复供电时,如果是瞬时故障,则合闸成功。然后由系统侧的检无压和 PV 侧的检同期设备将 PV 重新并网。如果是永久性故障,则闭锁线路的电流保护 I 段,由保护 II 段有选择地动作跳闸,并通过广域系统去通知对侧断路器跳闸以便从两端隔离故障,同时将故障段线路下游的负荷开关一并断开。随后故障段上游的原有 PV 电源可以重新并网,而其下游的 PV 电源先重新并网于空载母线上然后各个负荷开关根据 PV 的容量和调节能力逐一投入<sup>[9]</sup>,以保证 PV 和其负荷能够形成内部功率平衡的孤岛,以稳定运行。这样处理的好处在于减少了停电带来的损失,提高供电可靠性。

当如图 1 的 K1 发生时,这套保护方案可以保证不会发生非同期合闸;当 K2 发生时,因为在 PV 上游馈线都安装了方向电流保护,即使保护 1、2 有反向故障电流通经也不会误动。当如图 2 的 K3 发生时,同样因为保护 2 处的过流保护带方向所以不会误动;当 K4 发生时,通过广域测量系统可得到 BC 线路末端的功率方向是从母线到线路,再加上电流保护 2 的判别结果,即证明是 BC 发生故障,立即让保护 1 处 I 段快速动作跳闸。这样可防止因 PV 汲出作用而降低保护 1 的灵敏度。在 I 段动作跳闸后, PV 将退出并网,所以不会影响保护 2 的保护范围。

#### 5. 相关的改进措施

1) 将故障限流器(Fault Current Limiter, 简称 FCL)接入 PV 系统中,并依据系统具体情况来设置阻抗值。当正常负荷条件下, FCL 的阻抗为零;当检测到短路故障后, FCL 快速改变阻抗值以有效限制 PV 提供的故障电流,保证电网保护的灵敏性和选择性<sup>[10]</sup>。也可选用超导故障限流器(Superconducting Fault Current Limiter, 简称 SFCL)。它集检测、触发、限流于一体,能在高压下运行,响应时间快,可自动恢复<sup>[11]</sup>,具备其它限流装置无可比拟的优越性。

2) 采用光纤电流纵差保护作为短线路保护。电流纵差保护具有灵敏度高、动作可靠快速,不需与相邻线路保护配合,能适应系统震荡、非全相运行等优点,而光纤通道不受线路故障类型影响,抗电磁干扰能力强。所以光纤电流纵差保护能理想地使保护实现单元

化, 原理简单, 不受运行方式变化的影响, 而且由于两侧的保护装置没有电联系, 提高了运行可靠性<sup>[12]</sup>。

3) 利用多 Agent 技术来实现保护方案, 可实现较复杂的保护算法, 使保护在配合和整体上具有更好的自适应性和灵活性, 对信息的容错能力也更强<sup>[13]</sup>。

## 6. 结束语

由于当今能源匮乏, 光伏发电作为新兴的发电形式, 得到了快速的发展。而含有光伏电源配电网的保护方案也越来越被重视。本文就光伏电源并网对配电网保护产生的影响进行了理论分析和仿真验证, 提出了相应方案和改进措施, 有助于光伏发电并网的普及和配电系统的安全可靠运行。虽然目前相关的保护方案还处于探索阶段, 但相信随着对此问题的继续深入以及保护技术的发展, 有关光伏发电并网的保护将更合理、完善。

## 参考文献 (References)

[1] 张扬, 杨浩然. 光伏并网逆变器控制算法的研究[J]. 低压电

- 器, 2009, 9(19): 8-11.
- [2] IEEE. 1547 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems, 2003.
- [3] 赵平, 严玉廷. 并网光伏发电系统对电网影响的研究[J]. 电气技术, 2009, 20(3): 41-43.
- [4] 杨德继. 刍议基于断路的馈线保护及基于 FIU 的配网自动化[J]. 经营管理者, 2009, 19(22): 397-398.
- [5] 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.
- [6] 吴京涛, 谢小荣, 王立鼎等. 广域测量系统在电力系统的发展与展望[J]. 电力设备, 2006, 7(3): 46-49.
- [7] 陈朝晖, 赵曼勇, 周红阳等. 基于广域一体化理念的网络保护系统研究与实施[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 106-107.
- [8] 熊军. 分布式电源对配网的影响及准入容量的确定[D]. 浙江大学, 2006.
- [9] 孙景钊. 分布式发电条件下配电系统保护原理研究[D]. 天津大学, 2010.
- [10] W. El-Khattam, T. S. Sidhu. Restoration of directional overcurrent relay coordination in distributed generation systems utilizing fault current limiter. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 576-585.
- [11] 张绪红. 超导故障限流器的研究[D]. 湖南大学, 2004.
- [12] 许志澄. 光纤通道在纵联保护中的应用[J]. 中国科技博览, 2010, 31(33): 630-631.
- [13] 王慧芳, 何奔腾, 时洪禹. 多 Agent 技术在继电保护中的应用[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(3): 102-105.