

[分布式光伏]

基于分布式光伏发电接入配电网系统后对继电保护的影响研究

文/杨鹏杰 徐宇 李磊
云南电网有限责任公司昆明供电局

大量分布式光伏接入配电网系统后，很大程度上改变了配电网系统电源单一、潮流单向的特性，带来配电网原有的继电保护可靠性降低或失效的问题。通过分析含分布式光伏的配电网系统的拓扑结构及故障机理，提出适用于含高比例分布式光伏的配电网系统的继电保护整定方案。通过配电网系统中分布式光伏和故障发生位置对继电保护的影响进行评估，最后利用仿真测试结果验证了所提出的保护方法能提升继电保护动作的可靠性，确保有选择地快速切除故障。

随着全球气候变暖的加剧，新能源作为电网改革发展的重要驱动力，已成为全球可持续发展的重要支柱。在配电网领域，分布式太阳能发电、电力电子负载和设备的引进带来了全新的挑战，且在不断增加。

根据文献[4]所述内容，通过对电压稳定性的分析，可以计算出分布式电源的最大接入容量；通过应用先进的智能算法，文献[5]成功地提升了电压的稳定性，并大幅度减少了弃光率。随着分布式电源和储能技术的普及，传统的单相供电模式已发生了巨大的变化。虽然传统的继电保护系统和配电自动化系统仍然受到单相潮流的限制，但分布式光伏系统可以更好地抵抗短路电流，从而提高系统的可靠性与安全性，大幅提高继电保护的可靠性。分布式电源不仅能够有效地提升电流保护、距离保护和重合闸的效果，还具有协同性、自适应性等优势。文献[8]研究表明，没有采用分布式电源，就可能出现非正常的线路操作，使系统无法获得有效的防护。文献[9]构建了一个可以有效地将分布式电源和配电网联结起来的模型，从而有效地增强其过载保护功能。通过对逆变器的系统性研究，文献[10]提出了一个基于分布式电源的短路电流模型，该模型具备

了显著的定量分析能力，为实现精确控制提供了可靠的依据。通过对相关问题的全面探索，文献[11]提出了一种全新的、可靠的自动调整电流速断保护参数的技术，有效改善了系统的性能。文献[12]利用先进的电流保护技术，为各种应用场景提供了一种高效、稳定的解决方案，确保系统的安全性和可靠性。众多学者正研究如何有效地利用高渗透率的分布式能源，并制定一系列针对不断变化的应对策略，以确保其安全性、稳定性和可靠性。文献[14]采用双配置方向过电流保护策略可显著提升系统的安全性，实现更高效的系统管理。

综上所述，本文将深入探讨分布式光伏发电接入的配电系统，分析电力系统中电压、电流等参数的变化情况，更好地掌握光伏电站的运行状况，更有效地实施线路继电保护。通过实时数字仿真技术，建立一个分布式配电系统的继电保护整定方案，并提出改进建议来提高继电保护的可靠性。

分布式光伏配电网结构及建模

1. 分布式光伏发电系统的原理和结构

光伏发电技术是一种广泛使用的可再生能源技

术, 通过将太阳辐射的能量转换为电能来发电。在光照强度保持一致的情况下, 光伏发电功率保持稳

定。图1所示为分布式光伏发电系统的结构。

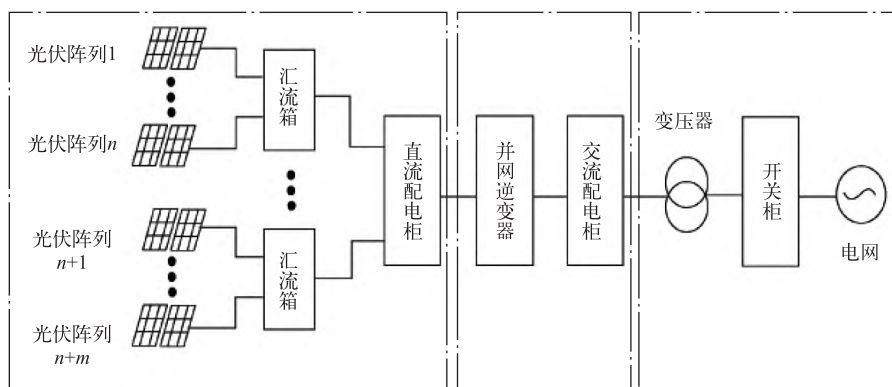


图1 分布式光伏发电系统结构图

利用光伏发电技术将太阳能转变成电能, 然后输送至汇流箱, 升压后被MPPT控制器输送至直流配电柜, 经逆变器进行直/交流变换后, 为配电网负荷供电。

2. 光伏电池数学模型

图2所示为单晶硅光伏电池的等效电路。

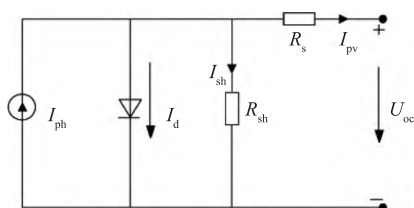


图2 光伏电池等效电路

图2中, I_{ph} 为光伏装置产生的电流; I_d 为流经等效二极管的电流; R_{sh} 为并联电阻; R_s 为串联电阻; I_{sh} 为流过并联电阻 R_{sh} 的电流。

光伏电池的输出电流 I_{pv} 为

$$I_{pv}^{out} = I_{sh} - c_1 I_{sh} \left[\exp\left(\frac{U}{c_2 U_{OC}}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中, c_1 、 c_2 为待定系数。计算公式为

$$c_1 = \left(1 - \frac{I_{sh}}{I_{sc}}\right) \exp\left(-\frac{U_m}{c_2 U_{OC}}\right) \quad (2)$$

$$c_2 = \left(\frac{U_m}{U_{OC}} - 1\right) \ln\left(1 - \frac{I_{sh}}{I_{sc}}\right)^{-1} \quad (3)$$

式中, U_{OC} 为光伏电池电压; I_{sc} 为短路电流。

3. 光伏发电并网结构

图3所示为一个先进的光伏并网系统, 通过Boost升压电路控制MPPT, 产生高压的直流电, 并

且精确地追踪到最大的功率点。三相并网逆变器将这些电力转化为更加稳定的交流电, 并通过有功传输控制和谐波控制技术, 将电力调节到与电网相同的频率, 极大地提升系统的性能, 将电力准确输送到电网中, 保障整个电力系统的稳定运行。

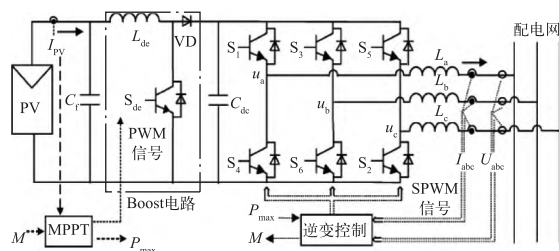


图3 光伏发电并网结构

图3中, I_{pv} 为光伏阵列输出电流; C_f 为是用于滤波的电容; L_{dc} 为直流侧电感; S_{dc} 为控制信号器; VD 为二极管; C_{dc} 为直流侧电容; M 为调制宽度; P_{max} 为在MPPT控制策略下输出最大功率; $S_1 \sim S_6$ 为电力电子元件; I_{abc} 为逆变器输出的并网三相电流值; u_a 、 u_b 、 u_c 为三相并网逆变器输出的三相电压; U_s 、 U_a 、 U_b 、 U_c 分别为电网输出的三相电压值; L_a 、 L_b 、 L_c 为线路电感。

分布式光伏接入对配电网保护的影响

随着技术的发展, 传统的配电网不是放射状的, 而是采用了三段式电流保护, 这样不仅能够节省成本, 而且能够更加高效地实现对线路的保护, 如图4所示。然而, 分布式电源的引入使传统的辐射式配电网的继电保护能力产生重大改变, 变得更

加复杂化。如果继电保护装置出现故障，例如误操作、保护拒动或重合闸失败，后果很严重，当连接在一起时，对整个系统的影响是显而易见的。图4展示了一种由单独的DG组成的配电系统。QF₀、QF₁、QF₂、QF₃、QF₄和QF₅均作为继电保护开关，以馈线为主要场所实现分布电源的连接。

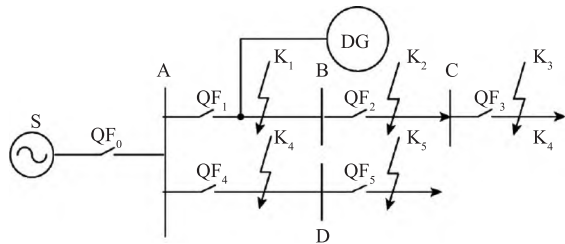


图4 有分布式电源的配网系统图

经过分析可以发现系统存在故障。

1) 如果系统线路AB上的K₁点出现短路故障将导致严重的后果，电源和分布式电源共同为K₁提供短路。当QF₁接收到的短路电流大于K₁时，保护范围下降。随着QF₁处保护跳闸，DG产生故障电流流入K₁点，K₁处的短暂故障可能会演变为持久性故障。

2) 如果BC上的K₂点发生了短路故障，QF₁处保护跳闸前，但系统电源和分布式电源可同时为K₂点提供故障电流，提升了QF₂处保护的灵敏度。

3) 如果系统线路K₃发生短路故障，电源和分布式电源将同时向故障点K₃提供故障电流，提高QF₃处保护的灵敏度。然而，当短路电流继续增大时，BC线路上的QF₂受到影响，进而引起故障范围的扩大化。

4) 如果AD线路上的K₄点出现短路故障，保护动作情况与K₂点的短路故障基本相同，电源与分布式电源共同向故障点K₄提供短路电流，从而提高QF₄处保护的灵敏度。

5) 如果系统线路K₅点出现短路故障，保护动作情况与K₂点的短路故障大致相同，通过电源与分布式电源共同作用，使得系统的短路电流提高，从而提升了保护的灵敏性。若短路电流继续增加，将会导致下一级线路采取防护措施，进一步扩大了故障的范围。

使用分布式供电系统会对配电网的稳定造成极大的影响。降低上游线路保护的灵敏度，或保护延时动作，甚至可能引发越级跳闸。此外，这种技术

能够提高下游线路保护的灵敏度，但同时也可能增加故障点上级动作的风险，对整个配电网的安全构成威胁。

仿真验证

本文选取典型的配电网拓扑网络模型进行分布式继电保护验证，光伏接入的位置及具体容量如图5所示。其中，网络拓扑结构模型的具体参数见表1和表2。

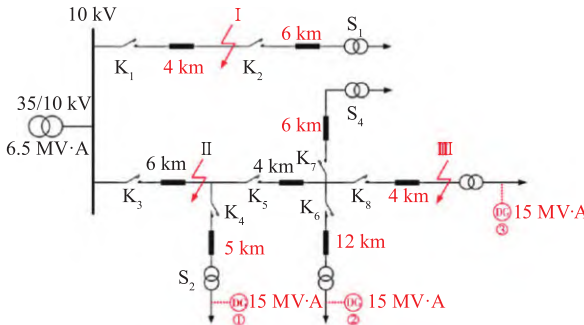


图5 含分布式光伏的配网拓扑结构

表1 典型配网拓扑结构变压器参数

变压器	电压等级/kV	容量/(MV·A)
35 kV变压器	35/10.5	7.5
S ₁ 变压器	10/0.4	0.5
S ₂ 变压器	10/0.4	2.0
S ₃ 变压器	10/0.4	2.0
S ₄ 变压器	10/0.4	0.8
S ₅ 变压器	10/0.4	2.0

表2 负载参数

负荷回路	有功/kW	无功/kvar
负载1	400	110
负载2	320	60
负载3	610	120
负载4	700	200
负载5	400	100

在配电网中，重点探讨电压和电流的变化情况，同时关注分布式光伏系统的外部因素。由于配电变压器的存在，中压配电网和分布式光伏系统之间的电压和电流变化可以得到有效抑制，使得外界环境变化不会对系统产生重大影响。光伏发电系统的效能取决于光照、温度和光伏板的电压，在发生故障时，可视为一个稳定的功率源。分布式光伏逆变器具有过电流保护功能，因此它能够提供的短路

电流最大可达运行电流的1.2~1.5倍,从而有效地保护用电设备免受损害。光伏系统是一种分布式的能源技术,光伏阵列、boost变换器和逆变器控制直流电压,达到MPPT的输出效率。

采用电流控制策略,并网逆变器可以有效降低交流侧谐波的影响。在仿真模拟中,采用受控电流源和逆变器取代传统的分布式太阳能发电,外部特征符合

$$P_{dc} = U_{dc} I_{dc} \tag{4}$$

式中, P_{dc} 为分布式光伏输出功率; U_{dc} 为逆变器直流电压; I_{dc} 为逆变器直流电流。

采用光伏发电机的调节技术,可有效地控制受控电流源的输出,达到准确掌握直流电压的目的。

对配电网各支路的保护测试,探讨分布式光伏系统在三段式电流保护中的重要作用。

1. 本级线路保护的I段保护效果的仿真验证

在进行三相短路故障诊断之前,为了更准确地识别出问题,应检测光伏系统的各相电流和电压的变化情况。系统中光伏接入容量为4.5 MV·A,而且故障点的比例超过线路全长的80%,观察图6、图7,对相关信息进行准确的分析。

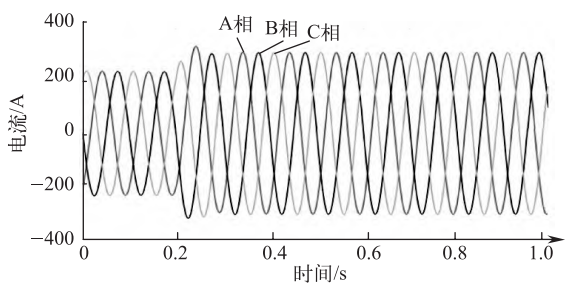


图6 三相短路故障时S4的三相电流波形图

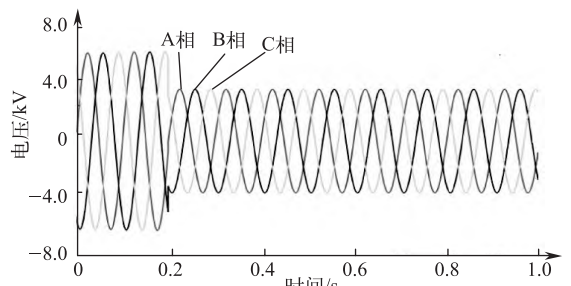


图7 三相短路故障时S4的三相电压波形图

由于故障位置的变化,在进行过电流保护前后,测量的电压和电流有效值也会发生变化。因

此,为了更准确地计算过电流I段整定值,应当采用本文的最新整定原则,以确保测量结果的准确性。对短路电流有效值的测量,如果超过整定值,保护动作,详情见表3。

表3 线路S4上发生故障前后保护3的I段的各项仿真值

类型	光伏总容量/4.5 (MV·A)		
位置系数	0.7	0.8	0.9
故障前电压/kV	5.7	5.7	5.7
故障电压/kV	2.3	2.5	2.6
故障前电流/A	145	145	145
故障电流/A	315	301	294
整定值/A	276	305	334
动作情况	动作	不动作	不动作
灵敏系数 (%)	79.98	79.91	79.86

从表3来看,采取上述调节措施能够有效地防止三相短路故障,保护效果达到80%,远超过预期的效果。尽管各个部件的故障可能会导致保护范围的微小差异,总的来说,保护装置的覆盖面积超过80%,显著增强了保护性能。

2. 本级线路II段保护效果的仿真验证

在S₄线路上,设置不同的故障发生位置,经过模拟发现S₄线路上的II段的过电流保护是合理的,而且模拟结果和实际测试数据完全吻合,具体情况见表4。

表4 线路S4上发生故障前后保护3的II段的各项仿真值

类型	光伏总容量/4.5 (MV·A)		
位置系数	0.6	0.7	0.8
故障前电压/kV	5.61	5.61	5.61
故障电压/kV	3.4	3.48	3.56
故障前电流/A	141	141	141
故障电流/A	189	159	152
整定值/A	276	305	334
动作情况	动作	不动作	不动作
灵敏系数 (%)	1.51	1.62	1.64

仿真分析,当故障超过故障线路长度的70%时,II段保护失效,但是I段保护仍然保持在80%,符合设计的方案的要求。

3. 后备保护的I段保护效果仿真验证

实际测试发现,在线路S₄发生短路故障的情况下,采取后备保护措施是有效的。调整故障发生的位置,从表5中看到有效的模拟结果。

表5 线路S₄上发生故障前后保护3的III段的各项仿真值

类型	光伏总容量/4.5 (MV·A)		
位置系数	0.2	0.4	0.6
故障前电压/kV	5.79	5.79	5.79
故障电压/kV	3.1	3.4	3.7
故障前电流/A	135	135	135
故障电流/A	207	178	170
整定值/A	124	140	193
动作情况	动作	不动作	不动作
灵敏系数 (%)	2.31	2.50	2.68

表5数据可看出,在保护II段的前提下,该方法可以有效地保护下级线路的40%以上。且考虑分布式电源作用后,对上游故障电流的保护灵敏度也会提升,保护可靠性和灵敏度对下级线路具有40%的保护范围。

结束语

随着新形势下复杂配电网的发展,传统的三段式保护措施已经不能满足需求。本文通过对分布式光伏并网故障特性影响原理的分析,提出了一种新的、更有效的保护方案,以满足新需求。经过深入研究,利用复杂配电网的继电保护技术测算后取得以下结论。

1) 利用过三段式保护方法,分析故障后分布式光伏系统的并网点分布情况,以及对继电保护系统设备的影响规律,从而有效地提高系统的安全性和可靠性。随着分布式光伏的普及,由于不同的并网点分布,会引起增流或分流效应,对继电保护系统造成严重的损害,甚至可能出现误动或拒动的情况。

2) 随着分布式光伏并网容量的持续增加,上下游保护的覆盖面和精准性将大大提高,有助于更好地预防可能出现的安全隐患,并确保系统的稳定性。

3) 采用自适应速断电流保护技术,基于分布式光伏并网保护方案,快速切除短路故障,有效地防止故障扩大化。EA

(收稿日期: 2023-07-12)

参考文献

[1] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.

[2] 李叶茂,李雨桐,郝斌,等. 低碳发展背景下的建筑“光储直柔”配用电系统关键技术分析[J]. 供用电, 2021, 38(1): 32-38.

[3] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.

[4] 吴薇,邓志敏,朱宝,等. 计及渗透率的分布式电源对配网电压的影响分析[J]. 信息技术, 2018, 42(5): 94-98, 105.

[5] 盖克胜. 基于弃光率优化的配电网电压控制方法研究[J]. 湖南电力, 2019, 29(5): 22-26, 30.

[6] 王宁,孙玲玲,贾清泉,等. 计及光伏调压能力的分布式光伏并网机会约束规划方法[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(6): 88-96.

[7] 竺庆茸,李晗,李先允,等. 含光伏的主动配电网非对称故障条件下对并网点电压影响的研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 101-106.

[8] C. D' Adamo, S. Jupe, C. Abbey. Global survey on planning and operation of active distribution networks-Update of CIGRE C6. 11 working group activities[C]//CIRED 2009 – 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – Part 1. Prague, Czech Republic, 2009: 1-4.

[9] 王进,许建兵. 风电接入对电网继电保护影响分析[J]. 山东电力技术, 2016, 43(12): 8-11.

[10] 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, 13.

[11] 曾德辉,王钢,郭敬梅,等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 86-92.

[12] 叶斌,王祺,代磊,等. 适应分布式电源接入的配电网过流保护整定策略[J]. 陕西电力, 2018(6): 74-80.

[13] S. M. Brahma, A. A. Girgis. Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 56-63.