

DOI: 10.7667/PSPC161102

光伏电站内用直流微网的接地方式分析

王健¹, 吴俊勇¹, 郝亮亮¹, 张巨瑞², 张皎³

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 北京京能清洁能源电力股份有限公司, 北京 100028;
3. 北京科锐博润电力电子有限公司, 北京 100083)

摘要: 接地方式的选择是直流微网设计的关键部分。以北京延庆八达岭 31.5 MW 光伏电站站内负荷用直流微网为例, 对直流微网的接地方式进行了分析。首先, 介绍了该直流微网的运行方式、拓扑结构及备选的几种接地方式。然后分别从稳态特性、故障特性以及人身安全三个方面, 对不同接地方式进行了深入的理论分析。最后在 PSCAD/EMTDC 中建立了该直流微网的电磁暂态仿真模型, 通过电磁暂态仿真对理论分析进行了验证。研究结果表明: 相比于其他接地方式, 电源侧通过大电阻接地的 IT 接地方式更适用于低压直流微网系统。

关键词: 直流微网; 接地方式; 双极运行; 光伏发电; 直流母线

Analysis of grounding mode of DC micro grid in PV station

WANG Jian¹, WU Junyong¹, HAO Liangliang¹, ZHANG Jurui², ZHANG Jiao³

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Jingneng Clean Energy Co., Limited, Beijing 100028, China; 3. Beijing Creat-poreen Power Electronics CO., LTD., Beijing 100083, China)

Abstract: The selection of grounding mode is the key part of DC micro grid design. In this paper, the grounding mode of DC micro grid is analyzed based on the example of Yanqing 31.5 MW Badaling photovoltaic power station. Firstly, this paper introduces the operation mode, topology structure and several grounding methods of DC micro grid. Secondly, different grounding modes are analyzed in theory from the steady-state characteristics, fault characteristics and personal safety aspects. Finally, the simulation model of the DC micro grid is established in PSCAD/EMTDC, and the theoretical analysis is verified by the electromagnetic transient simulation. The results show that, compared with other grounding methods, the power supply side is more suitable for low voltage DC micro grid system through the IT grounding mode with large resistance grounding.

Key words: DC micro grid; grounding mode; bipolar operation; photovoltaic (PV) power generation; DC bus

0 引言

随着能源危机的发展, 环保需求日益增加, 分布式发电技术得到了越来越多的重视和应用。但是分布式光伏电源因为具有受制于自然条件、灵活可控性差的特点, 对主网而言是一个不可控源。若直接并网, 将对现行电网的结构、规划、调度和监控产生影响。为了解决以上问题, 分布式电源可通过含储能的微网形式并入主网。微网包括直流微网和交流微网两种形式, 当前国内外已经投建的微网多为交流微网, 而对直流微网相关技术的研究还在进行中^[1-2]。

直流微网在设计时主要考虑拓扑结构、控制系统以及保护系统三方面。而对于直流微网保护系统的设计应首先确定接地方式, 直流微网的接地方式主要包括直流母线的接地、系统内电源端带电导体的接地、负荷端电气装备外露可导电部分的接地^[3]。不同接地方式下的故障特征差异很大, 从而决定了直流微网保护设计方案的不同。同时, 电气接地是电气安全技术工作之一, 接地是否合理不仅影响电力系统的正常运行, 而且关系到人身安全。另外, 接地方式的选择对负荷侧稳态电能质量也有一定的影响。因此正确选择接地方式是十分必要的。

直流微网中电源侧的接地方式指交流电网侧、新能源发电侧、储能侧接地方式, 具体包括直接接地、不接地、经阻抗接地。同时, 如图 1 所示, 根

据 IEC60364 对直流系统接地方式的定义^[4], 还需结合设备外壳的接地情况, 进一步将直流微网的接地方式分为 TN、TT 和 IT 三种方式。其中: 第一个字母表示电源侧的接地方式, T 表示接地, I 表示高阻接地或不接地; 第二个字母表示设备外壳的接地方式, N 表示直接接地, T 表示与电源端接地点相连。

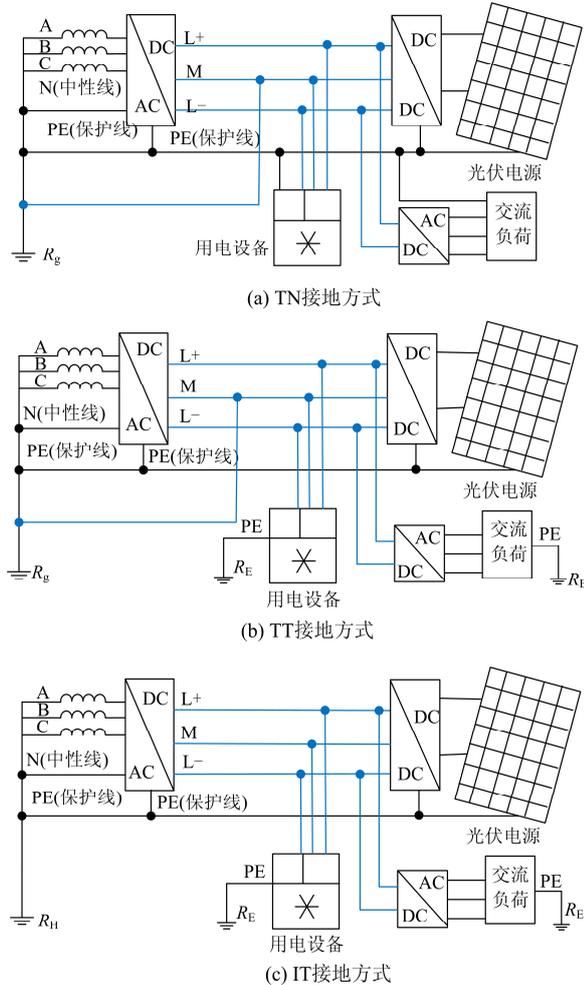


图 1 光伏电站内用直流微网接地方式的备选方案

Fig. 1 Scheme of DC micro grid grounding modes for PV station

现有文献多集中于对直流微网拓扑结构的研究, 而对直流微网接地方式的研究较少, 现场对接地方式的选择依据仍较模糊。文献[4]考虑到供电安全性以及供电可靠性, 提出海上风电、直流牵引系统等工业场合适合采用 IT 接地方式。文献[5]提出微网拓扑结构包括环状直流微网与辐射状直流微网。对于环状直流微网, 可以设置接地环解决微网内部接地问题; 而对于辐射状直流微网, 并没有提出确定的接地方式。文献[6]提到日本通信数据中心直流微网的接地方式, 分析指出 IT 系统为最佳方式。文献[7]分析在供电连续性上和电气安全性能方

面, TT 系统性能优于 IT 系统, IT 系统优于 TN 系统。文献[8]提到考虑负荷稳定性方面, 通信系统更适合使用 IT 系统, 民用或商用建筑物内更适合使用 TN 系统。日本大阪大学于 2006 年提出了一种双极结构的直流微网系统^[9-10], 其中直流母线中性点直接接地。文献[11]针对直流配电系统, 对换流器交流出口处不对称故障特性和直流线路单极接地故障特性进行了分析, 得出结论: 考虑故障电流以及故障后的恢复情况, 电压源换流器电容中点高阻接地方式优于直接接地方式。但并没有对电气安全以及供电连续性进行分析。

具体接地方式的设计一般需要考虑系统的稳态运行条件、暂态接地的故障后果、人身安全以及供电连续性与可靠性等, 因此, 不同应用场合、不同设计理念下的接地方式往往不同^[12]。本文以光伏电站内用直流微网供电系统为研究对象, 详细分析其接地方式的设计原则。在简要介绍系统运行方式、拓扑结构及常见接地方式的基础上, 从系统稳态特性、系统故障特征以及人身安全 3 个方面对接地方式的选择进行理论分析, 并通过电磁暂态仿真进行了算例验证。

1 光伏电站内用直流微网的运行方式及拓扑结构

1.1 直流微网母线变流器的运行方式

直流微网多采用电压源型换流器 (Voltage Source Converter, VSC)。如图 2 所示, 直流微网母线变流器的运行方式主要包括: 单极两线制、单极一线一地制、伪双极接地制和真双极接地制。

如图 2(a)所示的单极两线制系统采用两根导线构成直流侧单极回路, 直流线路中的一根导线用作正极或负极导线, 另一根用作金属返回线, 地中无电流通过^[13]。这种运行方式不利于直流微网中的负荷供电需求的多样性。

如图 2(b)所示的单极一线一地制系统利用一根导线和大地构成直流单极回路。经济性好, 但接地极会有电流通过, 需要接地极可靠接地, 对接地点和接地设备的要求较高。

如图 2(c)所示的伪双极接地制系统由单个换流器构成, 即正负两极导线和两端换流器的正负极相连。该方式能够降低母线的对地绝缘水平, 且能够保证正负极的对称性。而图 2(d)所示的真双极接地制系统由两个换流器并联组成, 适用于大容量场合。

本文所研究的直流微网用于北京延庆八达岭 31.5 MW 光伏电站站内用电电源, 实现光伏电站站

内用电的清洁化。考虑到直流微网中负荷的多样性, 为了满足不同负载变流器对输入电压平衡的要求, 该直流微网中采用伪双极系统。

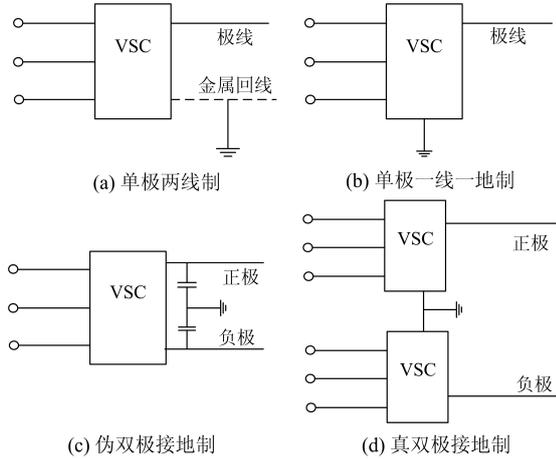


图 2 直流微网母线变流器的运行方式

Fig. 2 Operation mode of DC bus

1.2 光伏电站内用直流微网的拓扑结构

该直流微网主要由并网变流器(Grid-connected

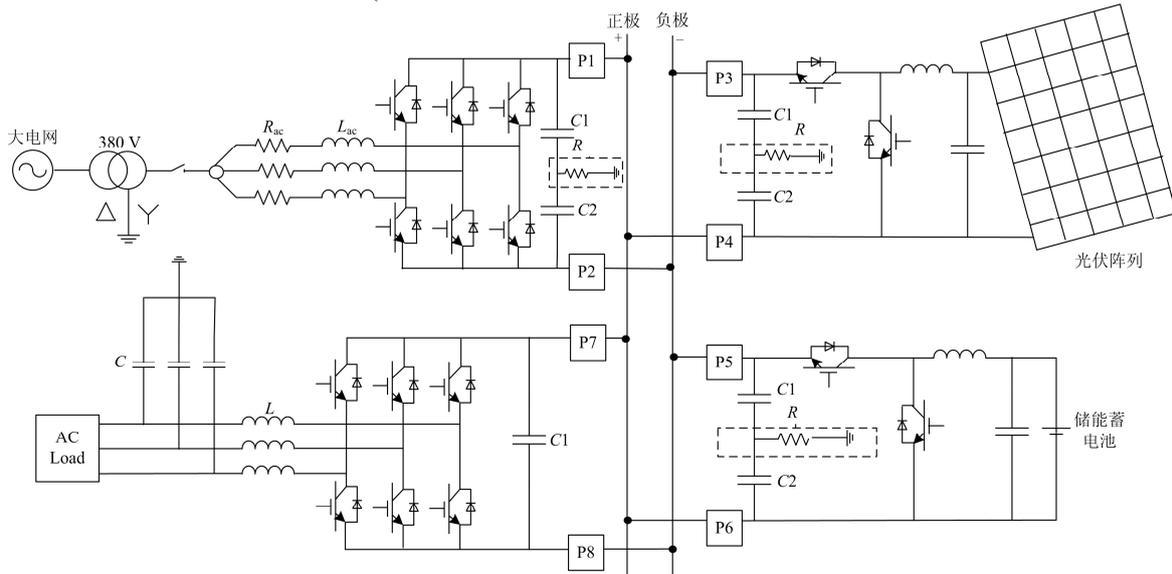


图 3 光伏电站内用直流微网的拓扑结构

Fig. 3 Topology of DC micro grid

2 对不同接地方式的理论分析

2.1 不同接地方式对系统稳态特性的影响

交流负荷通过三相半桥 VSC 并入直流母线, 逆变器通常采用基于电流量的 SPWM 控制方案^[15]。PWM 调制方法自身的技术特性, 决定了逆变器的输出含有较多主要集中在开关频率整数倍附近的高次谐波分量^[16], 且对于不同的控制方式其谐波分布与幅值略有差别。但无论何种 PWM 控制方式, 该

Converter, GCC)、光伏(Photovoltaic, PV)单元、光伏单向 DC/DC 变流器、蓄电池储能(Battery Energy Storage, BES)单元、储能双向 DC/DC 变流器以及交流负载组成^[14]。图 3 为所采用直流微网的拓扑结构, 直流母线电压为 750 V。经过核算站内负荷的最大值为 100 kVA, 系统中的光伏太阳能电池板及储能变流器的功率均为 100 kVA, 储能电池容量为 100 kWh。

直流微网中的直流母线直接与光伏变流器直流汇流母线和储能装置交换能量。正常状态下由光伏太阳能电池及储能装置为站内用电负荷提供能量, 具体地: 当白天光照充足时, 将光伏多发的电能存储在储能装置中; 当光伏的功率小于系统负荷需求时, 优先采用储能装置提供能量; 仅当储能装置的能量消耗到警戒值时, 改由电网为站内用电负荷提供能量。由于储能装置并不由大电网进行充电, 仅由光伏多发的电能充电, 可实现站内能源最大限度本地化、清洁化利用的效果。

类谐波分量的存在都将直接影响电能质量。因此, 必须在逆变器交流侧设置合理的 LC 滤波器, 以滤除 PWM 谐波, 并有效抑制低次谐波电流, 优化交流侧电能质量。

PWM 电压会在滤波器中产生谐波电流, 这些谐波电流会流入逆变器, 增加逆变器开关器件的关断电流; 过大的谐波成分还会加剧滤波电抗和滤波电容的发热, 所以必须将滤波器的电流控制在一定范围之内, 并且需要保证交流侧电流电压的总谐波

畸变率满足设置值。因此要注意 LC 电路的参数取值^[17], 滤波电容电感参数值选定同时决定了交流侧电流的谐波分量。

由于滤波器电容中性点接地, 即交流侧存在接地点。若此时直流侧有接地点, 如图 4 所示, 这时谐波电流会在逆变器的交直流两侧形成通路。电容电流的零序谐波分量增大, 交流侧的相电压谐波分量也会增大。若此时负荷侧接地, 则负荷电流中的谐波分量也会增大, 交流侧电能质量降低。

若直流侧无接地点, 则无谐波电流通路, 负荷侧电能质量在相同的情况下更好。因此从负荷侧稳态性能考虑, 直流侧电容中性点应对地绝缘。

同理, 对于并网逆变器, 交流侧通过变压器连接大电网, 为了避免直流微网内部故障后故障电流流入大电网, 通常变压器低压侧采用星形接地的方法, 直流侧电容中性点若接地也会产生零序谐波电流通路。

综上所述, 为抑制该零序谐波电流流入大地, 直流微网内部直流电源侧中性点应对地绝缘。

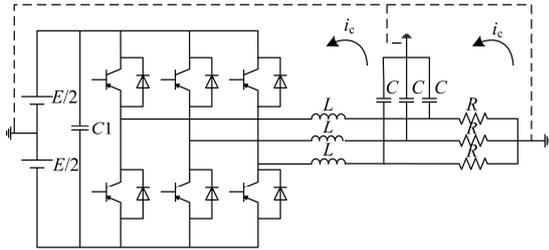


图 4 负荷侧的电路模型

Fig. 4 Circuit model of load side

2.2 不同接地方式对系统故障特征的影响

接地方式的不同会导致故障特征的不同。以下着重分析在低压直流微网中电源侧不接地与直接接地的情况下故障时的过电压与过电流问题。

(1) 直流母线发生极间故障

若电源侧接地, 则等效电路如图 5 所示, 图 5(a) 为瞬时状态, 图 5(b) 为稳态。故障开始, 电容快速放电, 直流电压逐渐下降, 后进入稳态, 稳态时直流侧电容和线路电感组成滤波电路, 母线电压降为 U' ^[18]。从等效电路图可以看出, 故障发生后的母线间电压变化与电源侧是否接地无关, 即电源侧的接地方式对两极极间故障特征无影响。

(2) 直流母线单极接地故障

若电源侧接地, 则故障支路与电源侧接地点构成放电回路, 等效电路见图 6, 电容放电, 故障极电压降为 0, 因为控制策略为控制直流母线电压为定值, 因此非故障极电压变为原来的 2 倍。极间电

压不改变, 无过电压存在, 由于电容的快速放电, 故障极流过较大的过电流。

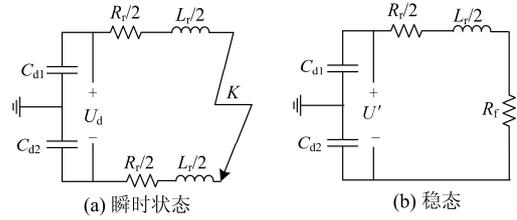


图 5 直流母线极间故障等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagrams of DC bus pole fault

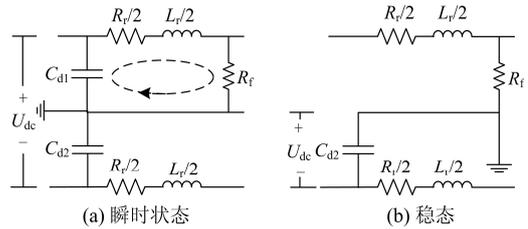


图 6 直流母线单极接地故障等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit diagram of DC bus single pole grounding fault

若电源侧不接地或经大电阻接地, 则故障极电压依然为 0, 非故障极电压变为原来的 2 倍, 不存在过电压的问题, 同时, 过电流值较小。

通过上述分析, 得到结论: 电源侧的不同接地方式下发生故障均不会产生过电压问题。但电源侧的接地方式的不同, 会对故障电流特征有影响。电源侧接地时, 系统会产生一个 di/dt 较大、幅值较大的过电流。

较大的过电流利于保护设备的动作。但直流微网含有大量的电力电子器件, 通常变流器自带限流功能, 会限制系统中的过电流大小, 因此保护系统的设计优势并不明显。同时, 电力电子变换装置提供电源的直流系统中, 一般均含有大量对过电流敏感的电力电子器件, 过大的 di/dt 会增加开关管的应力。

综上所述, 在考虑接地方式对故障特征影响的情况下, 电源侧对地绝缘的接地方式更适合含有较多电力电子器件的直流微网。

2.3 不同接地方式对人身安全的影响

在直流微网系统中, 电气负载设备较多, 人接触的机会也比较频繁。虽然光伏电站内用直流微网的电压等级属于低压范畴, 但当人触及载流导体时, 同样易发生危险^[19]。因此在选择低压直流微网接地方式时, 必须考虑对人身安全的影响。

在低压用电设备中, 相线碰壳故障是发生几率最大的一种故障类型, 会造成设备外壳电压的升高。

如果此时人站在发生了碰壳故障的设备旁边，身体触及设备外壳会造成人体与地之间的电位差(即接触电压)。接触电压是造成电击事故的主要原因，下面着重分析不同接地方式下的接触电压。

在实际中，交流负荷碰壳故障中，三相短路碰壳的几率很低，本文仅考虑单相碰壳故障。交流负荷单极碰壳故障时的等效电路如图 7 所示，接触电压的大小主要取决于流经接地保护电阻 R_E 上的故障电流的大小。

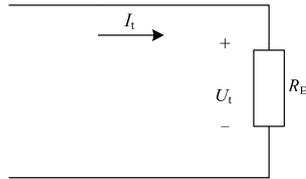


图 7 交流负荷碰壳故障的等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit of the failure of the shell of AC load side

TN 系统中故障电流大多经中性线流通，经保护接地流入大地的电流很小，故障处负荷电位升高较小。而对于 IT、TT 系统，故障电流经保护线流入大地，故障负荷处外壳电位升高较大，其中，IT 系统中电源侧对地绝缘，故障电流小于 TT 系统，因此 IT 方式下的接触电压小于 TT 方式下的接触电压。

因此，考虑人身安全，在交流侧发生相线碰壳故障时 TN 系统优于 IT 系统，IT 系统优于 TT 系统。

3 电磁暂态仿真验证

为了验证第 2 节中提到的接地方式对系统稳态特性、故障特征及人身安全的影响，本文在 PSCAD 中搭建直流微网仿真模型进行仿真验证。

仿真模型电路如图 3 所示。系统参数：1) 直流母线额定电压 750 V；2) 交流负荷功率 20 kW，储能电池 500 kWh，光伏电源 100 kW；3) 其中各变流器参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数

Table 1 Parameters of simulation system

元件	参数				直流电容
	额定容量/ kW	开关频率/ kHz	电感 L / mH	滤波电容 C / μF	
并网变流器	100	10	6	10	5 mF
光伏变流器	100	10	0.05	-	470 μF
储能变流器	100	10	2	-	470 μF
负荷变流器	100	10	6	10	470 μF

对 2.1 节中不同接地方式对系统稳态特性的影响进行仿真验证。当直流侧电源接地与不接地时，交流侧相电压、相电流波形如图 8(a)、图 8(b)所示。

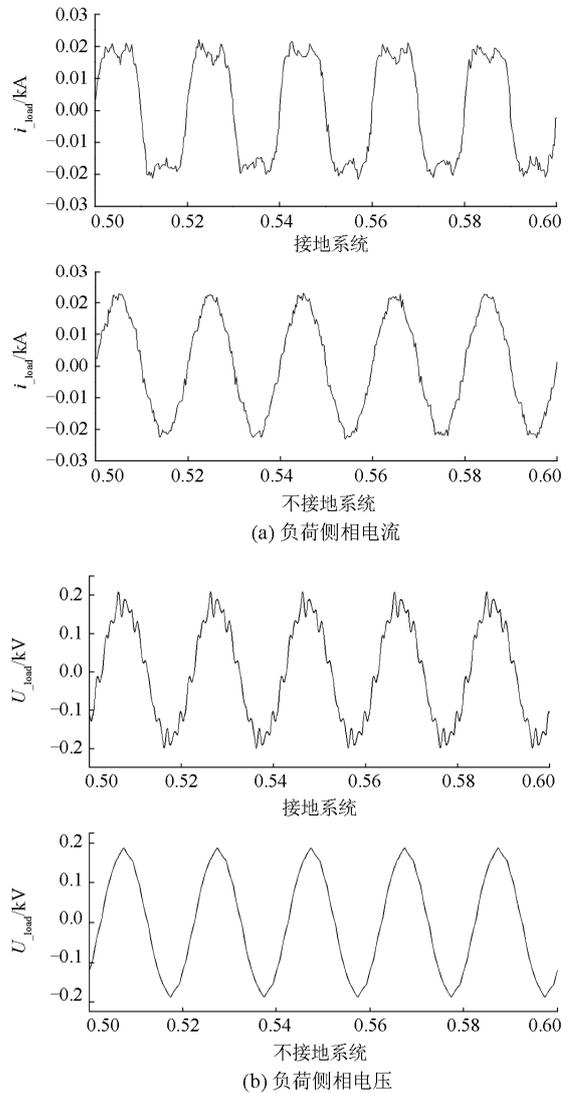


图 8 不同接地方式下交流负荷侧电压电流波形

Fig. 8 Voltage and current waveform of AC load side in different grounding modes

在本文所搭建的直流微网中，对直流母线单极接地故障进行仿真，验证 2.2 节中得到的结论。设置故障位置为直流母线，故障类型为正极接地，故障时间 3 s，持续时间 0.2 s，接地故障电阻为 0.05 Ω 。仿真结果如图 9 所示。

实验验证结论：电源侧的不同接地方式下发生单极接地故障会对故障电流特征有影响。电源侧接地时，系统会产生一个 di/dt 较大、幅值较大的过电流。电源侧对地绝缘时电源侧接地，系统不会产生 di/dt 较大、幅值较大的过电流。

电源侧的不同接地方式下发生单极接地故障均不会产生过电压问题，母线电压维持不变，但由于正极负极电压不对称，会造成负荷侧电压偏移。

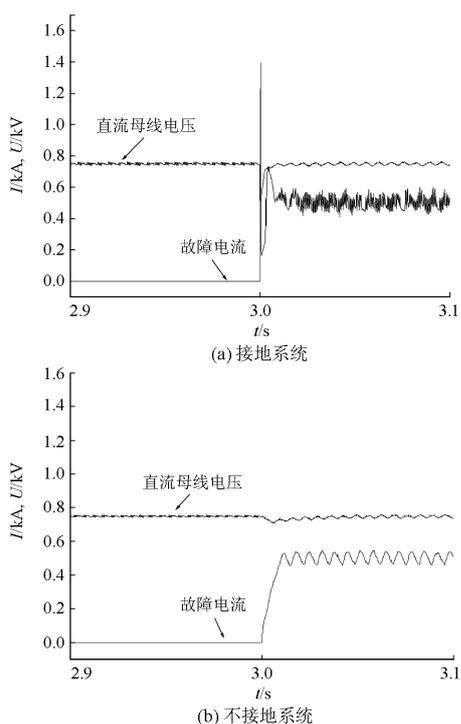


图 9 母线单极接地故障波形图

Fig. 9 Waveform of single pole grounding fault

在本文所搭建的直流微网中, 对直流母线极间接地故障进行仿真, 设置故障位置为直流母线, 故障类型为母线极间故障, 故障发生时间 3 s, 持续时间 0.2 s。仿真结果如图 10 所示。

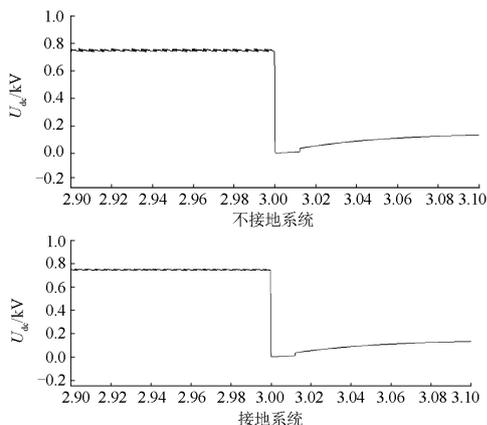


图 10 极间故障直流母线电压

Fig. 10 DC bus voltage when pole fault

仿真结果表明, 在直流电源侧接地与不接地系统中发生极间故障, 直流母线电压跌落情况完全相同, 即验证了系统接地方式对直流母线极间故障无影响。

在本文所搭建的直流微网中进行负荷侧相线碰壳绝缘故障仿真, 验证 2.3 节中得到的结论。对于 380 V 交流网保护接地电阻一般不大于 4Ω , 在此选

择 1Ω 。故障类型为交流负荷区域内 C 相发生绝缘碰壳故障。仿真结果如图 11 所示。

从仿真结果中可以看出, 当负荷侧发生相线碰壳的绝缘故障时, TN 接地方式故障电流最大, 可启动过流保护, 而 IT、TT 方式则因保护接地电阻限制了故障电流的大小, 过流保护可能发生拒动, 应配置其他保护措施。

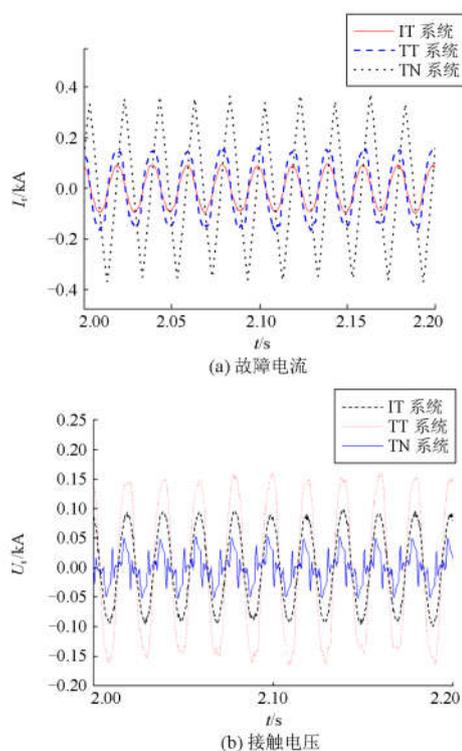


图 11 交流负荷侧发生相线碰壳绝缘故障

Fig. 11 AC load occurs isolation fault

发生相线碰壳故障时, TN 方式下, 故障点处接触电压升高较小, 但由于 TN 方式下所有负荷外壳都接在中性线或 PE 线上, 非故障负荷外壳也带电; IT 系统与 TT 系统中, 由于发生负荷相线碰壳故障时故障点的接触电压升高较多, 超过安全允许的接触电压, 对绝缘的要求较高。一旦绝缘发生问题, 则会给操作者的人身安全带来威胁。

4 结论

本文通过理论分析及电磁暂态仿真对光伏电站内用直流微网的接地方式进行了研究, 主要结论如下:

1) 综合考虑稳态特性、故障特征以及人身安全, 电源侧对地绝缘的 IT 接地方式更适用于基于太阳能发电站内负荷直流微网的供电系统。

2) IT 系统中包括电源侧不接地与经高阻接地两种, 本文认为可以选择经高阻接地, 接地电阻的取值对继电保护整定值的设置有一定的有利影响。

参考文献

- [1] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106.
WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106.
- [2] 唐洪良, 郑军, 杨强. 直流微型电网保护系统的研究现状与关键技术[J]. 电工电气, 2014(10): 1-6.
TANG Hongliang, ZHENG Jun, YANG Qiang. Present study status and key technology of protection system for direct current micro-grids[J]. Electrical and Electric, 2014(10): 1-6.
- [3] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [4] 李博通, 李斌, 李永丽, 等. 低压微网接地技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 53-59.
LI Botong, LI Bin, LI Yongli, et al. Earthing schemes in low-voltage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 53-59.
- [5] 黄文焘, 邵能灵, 范春菊, 等. 微电网结构特性分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 149-155.
HUANG Wentao, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Study on structure characteristics and designing of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 149-155.
- [6] HIROSE K, TANAKA T, BABASAKI T, et al. Grounding concept considerations and recommendations for 400 V DC distribution system[C] // Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011 IEEE 33rd International: IEEE, 2011: 1-8.
- [7] 李露露, 雍静, 曾礼强, 等. 低压直流双极供电系统的接地型式研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2210-2218.
LI Lulu, YONG Jing, ZENG Liqiang, et al. Researches on grounding types of low-voltage DC bipolar distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2210-2218.
- [8] SALOMONSSON D, SÖDER L, SANNINO A. Protection of low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1045-1053.
- [9] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T, et al. DC micro-grid for super high quality distribution — system configuration and control of distributed generations and energy storage devices[C] // Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC'06. 37th IEEE: IEEE, 2006: 1-7.
- [10] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.
- [11] 鲁国正, 高亮, 梁智敏. 电压源换流器接地方式对直流配电系统的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 75-80.
LU Guozheng, GAO Liang, LIANG Zhimin. Influence of voltage source converter grounding mode on DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 75-80.
- [12] 杨杰, 郑健超, 汤广福, 等. 电压源换相高压直流输电系统接地方式设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 14-19.
YANG Jie, ZHENG Jianchao, TANG Guangfu, et al. Grounding design analysis of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 14-19.
- [13] 朱克平. 适用于分布式电源接入的直流微网研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
ZHU Keping. Study of DC microgrid adapted to distributed power supply[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [14] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [15] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [16] 管敏渊, 徐政. 两电平 VSC-HVDC 系统直流侧接地方式选择[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 55-60.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Two level VSC-HVDC system DC side grounding mode selection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 55-60.
- [17] 金亮亮, 周荔丹, 姚钢, 等. 适用于并网逆变器的新型 LCL 滤波器[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 1-8.
JIN Liangliang, ZHOU Lidan, YAO Gang, et al. A novel LCL filter adopted in grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 1-8.
- [18] 高一波. 直流配电系统接地故障分析与接地方式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
GAO Yibo. Study on grounding fault analysis and grounding mode of DC power distribution system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [19] 张合栋, 杨秀, 王海波, 等. 城市微网接地方案探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 137-142.
ZHANG Hedong, YANG Xiu, WANG Haibo, et al. Study on grounding arrangement of microgrid of city[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 137-142.

收稿日期: 2016-07-19; 修回日期: 2016-09-13

作者简介:

王健(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流微网的控制与保护; E-mail: 14121465@bjtu.edu.cn

吴俊勇(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制、新能源发电和智能电网、铁道电气化、电力信息化。

(编辑 葛艳娜)