引用格式:白金,周秀,杨鑫,等.光伏接入与系统短路叠加引起的复杂工况对配网避雷器运行的影响[J].电力科学与技术学报,2025,40(5):315-324.
Citation: BAI Jin, ZHOU Xiu, YANG Xin, et al. Impact of complex operating conditions caused by superposition of photovoltaic access and system short-circuit on distribution network lightning arrester operation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(5):315-324.

光伏接入与系统短路叠加引起的复杂工况对配网避雷器运行的影响

白　金[1],周　秀[1],杨　鑫[2],田　天[1],殷　睿[2]
(1.国网宁夏电力有限公司电力科学研究院,宁夏 银川 750002;2.长沙理工大学电网防灾减灾全国重点实验室,湖南 长沙 410114)

摘　要:近年来,大量光伏电源接入配电网,由此引起的线路电压波动成为研究热点。然而,目前对配网发生短路故障产生的过电压与光伏接入引起的系统电压波动相叠加所形成的复杂工况认识不足,对该工况下配网避雷器等设备的故障机制缺乏了解。为解决以上问题,搭建了含光伏接入的变电站过电压仿真计算模型,在叠加系统短路过电压的情况下,仿真分析光伏接入时,系统遭受小扰动对光伏并网点的电压影响,从而发现光伏接入后,在相同故障条件下,并网点过电压幅值更大且持续时间更长。由实际故障案例发现,若电压幅值增加23%,则持续时间延长3.5倍。将复杂工况下的电压波形施加到所搭建的避雷器通流容量的计算模块中,分析其对避雷器热电荷传送值的影响。典型案例条件下的仿真结果表明,光伏接入前后,碰线短路故障致使避雷器动作情况下的热电荷传送值从0.65 C上升至1.85 C,吸收能量增大了1.8倍,该能量足以导致避雷器发生热崩溃。相关研究加深了对含大量光伏接入配网避雷器的复杂运行工况的认识,为指导配网避雷器选型提供了方法。

关　键　词:光伏接入;系统短路;配网避雷器;复杂运行工况;热电荷传送值
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.05.030　　**中图分类号**:TM614　　**文章编号**:1673-9140(2025)05-0315-10

Impact of complex operating conditions caused by superposition of photovoltaic access and system short-circuit on distribution network lightning arrester operation

BAI Jin[1], ZHOU Xiu[1], YANG Xin[2], TIAN Tian[1], YIN Rui[2]
(1. Electric Power Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750002, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In recent years, a large number of photovoltaic power sources have been connected to the distribution network, and the line voltage fluctuations caused thereby have become a research hotspot. However, at present, there is insufficient understanding of the complex operating conditions formed by the superposition of overvoltage generated by short-circuit faults in the distribution network and system voltage fluctuations caused by photovoltaic access, as well as a lack of knowledge about the fault mechanisms of distribution network lightning arresters and other equipment under such operating conditions. To solve the above problems, a simulation calculation model for substation overvoltage with photovoltaic access is established. Under the condition of a superimposed system short-circuit overvoltage, the impact of small system disturbances on the voltage at the photovoltaic grid-connected point during photovoltaic access is analyzed through simulation. It is found that after photovoltaic access, under the same fault conditions, the overvoltage amplitude at the grid-connected point is larger, and the duration is longer. By taking actual fault cases as examples, it is found that if the voltage amplitude increases by 23%, the duration will be extended by 3.5 times. The voltage waveform under complex operating conditions is applied to the constructed calculation module for the current-carrying capacity of the lightning arrester, and its impact on the thermal charge transfer value of the lightning arrester is analyzed. Simulation

收稿日期:2024-10-15;**修回日期**:2024-11-18
基金项目:国网宁夏电力有限公司科技项目(5229DK230008)
通信作者:周　秀(1984—),男,硕士,正高级工程师,主要从事高电压与绝缘技术研究;E-mail:296029608@qq.com

results under typical case conditions show that before and after photovoltaic access, under the condition that the line-to-line short-circuit fault triggers the operation of the lightning arrester, the thermal charge transfer value increases from 0.65 C to 1.85 C, and the absorbed energy increases by 1.8 times, which is sufficient to cause thermal collapse of the lightning arrester. Relevant research has achieved a deeper understanding of the complex operating conditions of distribution network lightning arresters with a large number of photovoltaic accesses, and provides a method for guiding the selection of distribution network lightning arresters.

Key words: photovoltaic access; system short-circuit; distribution network lightning arrester; complex operating condition; thermal charge transfer value

在国家提出“双碳”目标后，光伏发电产业发展迅速，其在我国能源系统中所占的比重越来越大[1]。光伏电源接入后，配电网转变为多电源的复杂结构，故障特性将会产生新的变化[2]。光伏并网引入了大量电力电子元件，控制更加复杂，系统参数众多，在系统遭受扰动后容易与电网发生相互作用而引发电力系统电压暂态过程剧烈变化[3]。

更有甚者，配网发生短路故障产生的过电压与光伏接入引起的系统电压波动相叠加，严重威胁配网避雷器等设备的安全运行[4-9]。近年来，国内多个含光伏接入的变电站因配电线路短路故障引发了避雷器炸裂事故。因此，需要对光伏接入配网后引起的系统电压变化与系统操作过电压叠加后的复杂工况对避雷器运行的影响进行深入研究，以确保配电网安全运行[10-18]。

目前，针对光伏电源接入配电网对电网电压波动的影响以及配电网避雷器的安全运行条件，国内外学者已经进行了一定程度的研究。文献[19]研究了光伏接入后对系统频率特性、电压特性和功角稳定性的影响，指出大规模光伏接入配电网将会直接使配电网原有的辐射型网状架构发生变化，进而影响电网的潮流和电压分布。文献[20]针对光伏接入的2种不同形式(集中式接入和分布式接入)，对并网后所造成的不同影响进行了研究。文献[21]建立了基于撬棒(crowbar)低穿策略的逆变型分布式电源数字仿真模型，探讨了其在不同故障条件下的短路电流暂态特性。文献[22-23]将模态分析法应用于光伏并网系统，并利用该方法检测出网络中谐波谐振频率和出现位置。文献[24]将微电网作为一个整体，分析了微网对电网渗透率的改变对大电网稳定性的影响。可见，目前的研究主要是针对光伏接入配网后，系统稳态及暂态特征的变化，其中对于暂态特征的研究，主要体现在光伏系统在故障情况下提供的短路电流对于系统继电保护设备的影响情况。文献[25]给出了避雷器安全阈值的判定方法，在配变前基杆塔架设耦合地线，且无须对杆塔进行接地处理，即可将流经高压侧避雷器的过电流幅值和热电荷传送值限制到安全阈值以下。

然而，就目前的研究结果和故障案例来看，光伏等新能源的接入，对配电网产生的电压波动并不显著，大都不足以引起避雷器动作。事故案例也表明，只有当叠加变电站配电侧短路故障引起过电压时，才会发生配电避雷器爆炸的事故，而目前的研究结果对这种复杂工况的认识还不足。

针对含光伏接入的配电网，考虑系统发生短路故障时，光伏系统与故障电压耦合的复杂工况，本文利用电力系统仿真软件，搭建了变电站过电压计算模型，仿真验证了光伏接入与否对光伏接入点的电压影响情况，继而通过计算金属氧化物避雷器(metal oxide arrester，MOA)的热电荷传送值来评估避雷器的热承受能力，研究了该复杂工况对配网避雷器可靠运行的影响，进一步澄清了光伏接入引起的配电网电压波动的复杂工况，为复杂工况下配网避雷器的选型提供了依据。

1 含光伏接入的变电站过电压仿真计算模型

本文针对国内多个含光伏接入的变电站在站内配网侧发生短路时避雷器发生炸裂的事故，依据某一典型变电站的电气一次接线图，并结合实际故障情况，在电力系统仿真软件中建立其对应模型。该变电站电气接线图如图1所示。该变电站主要由光伏系统、主变压器、输电线路、用电负荷、母线构成。

以该变电站某次避雷器事故为例，事故发生时，变电站的一条连接光伏发电的35 kV配电线路的B相与一条110 kV输电线路的A相由于异物短接而发生短时碰线。其短路电流从35 kV线路经过110 kV变电站的中性点入地。碰线导致35 kV系统电压升高(其中A相最严重)，配电线路A相上的避雷器动作并发生爆炸。且35 kV与110 kV线路的短时碰线相较于变电站的各种故障还不是最严重

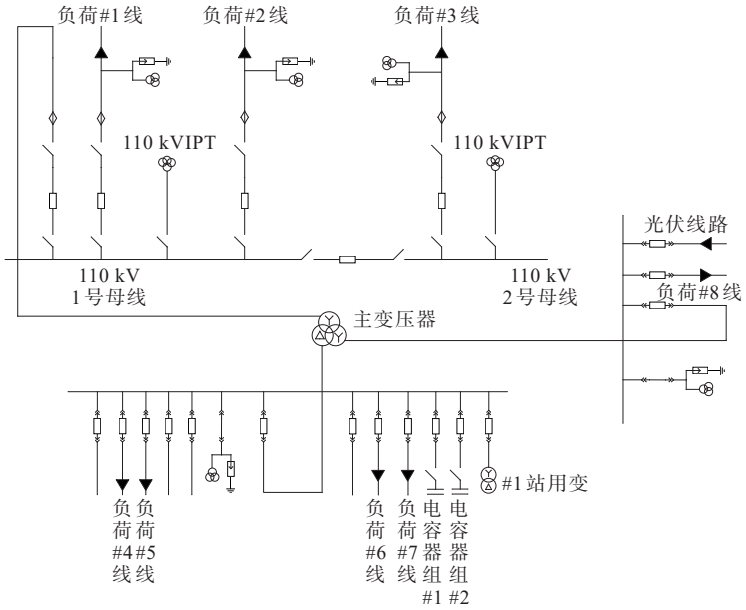

图 1　某变电站的电气一次接线

Figure 1　Primary wiring diagram of substation

的情况，输电线路的三相短路和变压器短路等故障都比短时碰线严重得多。

在接入光伏系统之前，该变电站由异物短路造成的不同电压之间的碰线事件仅有避雷器动作记录，没有出现避雷器爆炸案例。而在光伏系统接入之后，碰线事件造成多起避雷器爆炸事故。因此，需要对该故障情况下避雷器爆炸的原因进行仿真分析。

1.1　光伏阵列

光伏电池通过光生伏特效应将光能转化为电能[26]，其 I-V 特性方程如下：

$$I = I_1 - I_0\left\{\exp\left[\frac{q}{\lambda kT}(V + R_s I)\right] - 1\right\} - \frac{V + R_s I}{R_h} \tag{1}$$

式中，I 为光伏电池在特定工作点下的电流输出；V 为光伏电池在特定工作点下的电压输出；q 为电子电荷；T 为光伏电池的工作温度；I_1 为光生电流；λ 为二级管特性因子；k 为玻尔兹曼常数；I_1 为光生电流；I_0 为反向饱和电流；R_s 为等效串联电阻；R_h 为等效并联电阻[27]。一般情况下 R_h 远大于 R_s，因此输出特性方程可以简化为

$$I_L = I_1 - I_0\left[\exp\left(\frac{q}{\lambda kT}V\right) - 1\right] \tag{2}$$

光伏阵列是光伏并网系统的重要部分。在电力系统仿真建模中采用的仿真内置光伏阵列集成模型如图 2 所示。用户可以直接指定光伏输出的有功功率值。

该光伏阵列采用集中接入，系统输出模式调整为有功输入。其总容量设定为 10 MW，实际运行时的有功功率输入为 5 MW。系统内部的变流器及其他选项均采用默认设置。

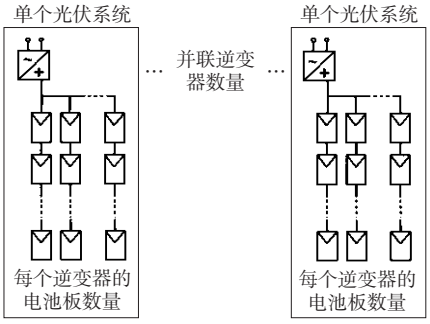

图 2　光伏阵列集成模型

Figure 2　Integrated model of photovoltaic array

1.2　变压器建模

该变电站选用 SFS10-50000/110 型号的变压器，该变压器包含 110、35、10.5 kV 3 个电压等级。变压器实物图如图 3 所示。

图 3　变压器实物

Figure 3　Physical diagram of transformer

在电力系统仿真建模中采用仿真内置的三绕组变压器模型。考虑实际可能的稳态电压变化情况，仿真中为该变压器的高压侧与中压侧各设置3个分接头，分接头电压分别为110±1.25%、35±2.5% kV。变压绕组连接方式为YN/yn0/d11，其基本参数如表1所示。

表1 变压器基本参数

Table 1 Basic parameters of transformer

高压/kV	中压/kV	低压/kV	连接组别	空载损耗/kW	负载损耗/kW	空载电流/%	阻抗电压/%		
							高-中	高-低	中-低
110±2×2.5%	35±2×2.5%	10.5	YN/yn0/d11	39.6	212.5	0.1	17.5	10.5	6.5

1.3 输电线路建模

结合变电站所用输电线路的实际架设情况，仿真中3组电压等级所采用线路均为架空输电线路，未使用电缆。由于仿真中不考虑雷电波冲击的影响，因此输电线路采用集总参数线路模型。输电线路选用型号如表2所示。

1.4 变电站整体建模

本文结合中国西北某事故变电站的电气接线图在电力系统仿真软件中建立如图4所示的含光伏接入的变电站模型，其参数设置如下：光伏阵列工作在光照强度为1 000 W/m^{2}和温度为25 ℃的标准测试条件下输出3 MW有功功率。110 kV输电线路长度为10 km，35 kV输电线路长度为5 km，10 kV输电线路长度为3 km，系统频率为50 Hz。

表2 输电线路选用型号

Table 2 Selected models of transmission lines

电压等级/kV	导线类型	线路电阻 r/(Ω·km^{-1})	线路电抗 x/(Ω·km^{-1})	线路电导 g/(S·km^{-1})	线路电纳 b/(S·km^{-1})
10	LGJ-25	1.25	0.39	0	2.83×10^{-6}
35	LGJ-35	0.92	0.43	0	2.65×10^{-6}
110	LGJ-70	0.45	0.44	0	2.56×10^{-6}

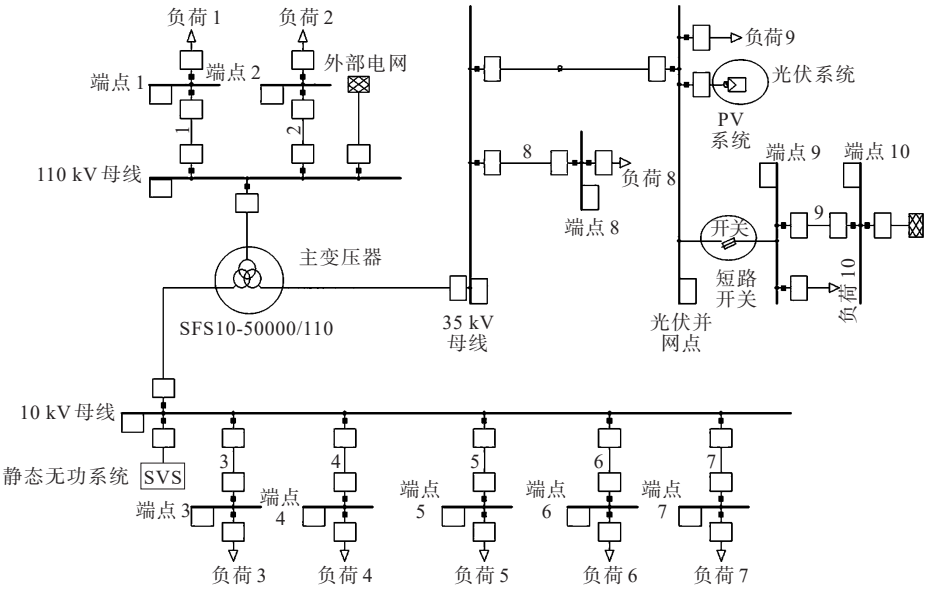

图4 含光伏接入的变电站结构

Figure 4 Substation structure with photovoltaic access

1.5 短路故障设置

在光伏并网点及110 kV线路之间设置一个熔断器起开关作业，用以模拟35 kV线路与110 kV线路的短路。该熔断器无损耗且容量无限大，即该熔断器无论在多大的电流下都不会出现熔断。短路故障模型如图5所示。

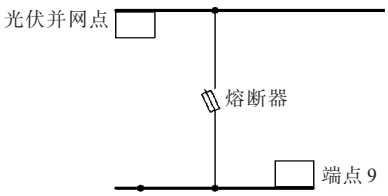

图5 短路故障模型

Figure 5 Short-circuit fault model

2　含光伏接入的变电站过电压仿真计算结果

2.1　光伏未接入时输电线碰线的仿真分析

光伏接入前并网点电压如图 6 所示。在光伏并网点未接入光伏系统时，35 kV 线路 B 相与 110 kV 线路 A 相在 0.1 s 时短接，0.17 s 时故障消失。

光伏并网点附近线路电压升高，其中 35 kV 线路的 A 相电压增幅最大。碰线故障开始时，电压稳定升高。在故障消失瞬间，电压骤增至 200 多千伏，经过一个暂态过程后，电压恢复至稳定运行状态。

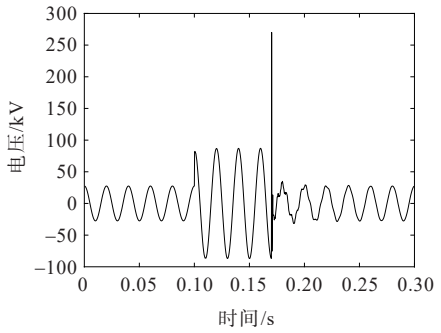

图 6　光伏接入前并网点电压

Figure 6　Voltage at grid-connected point before photovoltaic access

由图 6 可以看出，故障消失瞬间的过电压上升速度快，且电压较高，该过程中的电压冲击对避雷器影响最大，因此，需要对过电压进行更进一步的观察。光伏接入前 0.170～0.176 s 的并网点电压如图 7 所示。

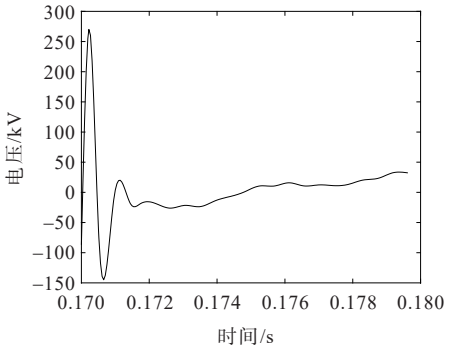

图 7　光伏接入前的并网点电压（0.170～0.176 s）

Figure 7　Voltage at grid-connected point before photovoltaic access (0.170～0.176 s)

由图 7 可以看出，该并网点电压最高升至 274 kV，但故障持续时间很短，仅有 0.07 s，故障消失 2 ms 后电压不再剧烈波动，并维持在较低水平，说明系统在经历一个短时的暂态过程后，将逐步恢复至稳定运行。后续小幅度范围内的电压波动因电压幅值较低，达不到避雷器的起始动作电压。

2.2　光伏接入时输电线碰线的仿真分析

光伏接入后并网点电压如图 8 所示。在光伏并网点增加光伏系统后，故障过程中并网点电压升高程度与光伏未接入时几乎没有区别。故障消失的瞬间，其电压升高至 300 多千伏，同时，电压波动的暂态过程持续时间更长，波动更加剧烈。

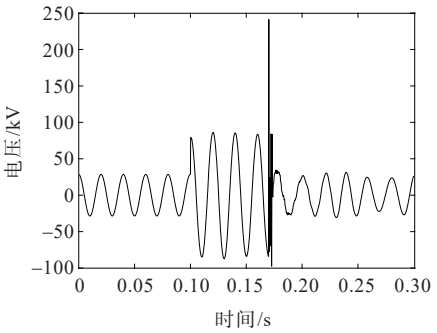

图 8　光伏接入后并网点电压

Figure 8　Voltage at grid-connected point after photovoltaic access

由图 8 可以看出，该并网点电压最高升至 337 kV，暂态电压波动持续时间相较光伏未接入情况下延长了一倍，且该电压波动极其剧烈，除最高的 337 kV 峰值电压以外还出现了 4 次 100 kV 左右的电压。光伏接入后该并网点电压在 0.170～0.176 s 的波形如图 9 所示。

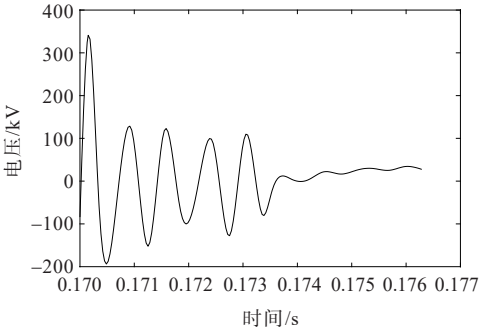

图 9　光伏接入后的并网点电压（0.170～0.176 s）

Figure 9　Voltage at grid-connected point after photovoltaic access (0.170～0.176 s)

由图 9 可以看出，光伏接入后，由于光伏并网点接收了额外的光伏系统电能供给，在故障消失的瞬间，其电压幅值比光伏未接入情况下升高了 23%；同时，光伏系统包含的电力电子器件，在故障消失瞬间也与其发生相互作用，产生了近似 4 个周波的振荡后，才逐渐过渡到稳定运行状态。

3 光伏接入引起的电压波动对MOA运行的影响

光伏接入配电网后，当系统发生故障时，由光伏电源提供的短路电流将不断增大，必然对配电网的设备提出更高的绝缘要求，而作为绝缘保护设备的避雷器运行条件将更为苛刻。

由上述研究可知，光伏的接入会导致故障过电压幅值增大，过电压的波动持续时间延长，避雷器运行条件恶化，严重时将直接造成避雷器的爆炸。

为了判断光伏接入叠加系统短路引起的过电压对避雷器热承受能力的影响，在ATP-EMTP中搭建了避雷器吸收过电压能量的仿真计算模型。

3.1 故障过电压的波形拟合

在ATP-EMTP计算之前，需要先对上述过电压波形进行处理。将上述2组波形数据进行傅里叶分析，并将傅里叶分析后得到的振幅、频率、相位通过MATLAB进行多正弦函数拟合。

在MATLAB中拟合光伏接入前、后0.170 s～0.176 s的并网点电压分别如图10、11所示。

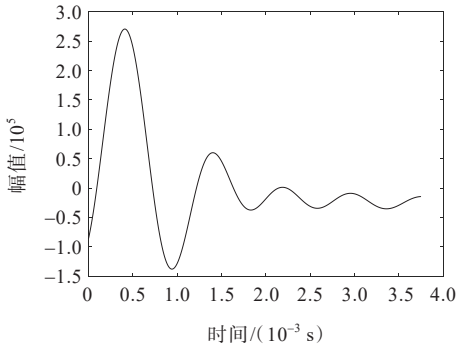

图10 拟合光伏接入前的并网点电压(0.170～0.176 s)

Figure 10 Fitted voltage at grid-connected point before photovoltaic access (0.170～0.176 s)

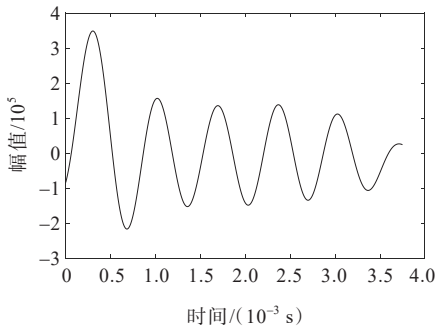

图11 拟合光伏接入后的并网点电压(0.170～0.176 s)

Figure 11 Fitted voltage at grid-connected point after photovoltaic access (0.170～0.176 s)

由图10、11可知，MATLAB拟合情况基本契合仿真波形。

3.2 避雷器吸收过电压能量的仿真计算模型

3.2.1 电压源建模

将MATLAB中拟合的多个正弦函数导入ATP-EMTP的MODELS模块中，并将其作为自定义电压模块进行电压输出。

该模块模拟输出的光伏未接入和光伏接入情况下的电压波形分别如图12、13所示。

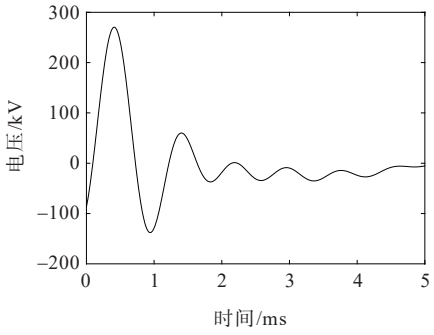

图12 光伏未接入的输出电压波形

Figure 12 Output voltage waveform without photovoltaic access

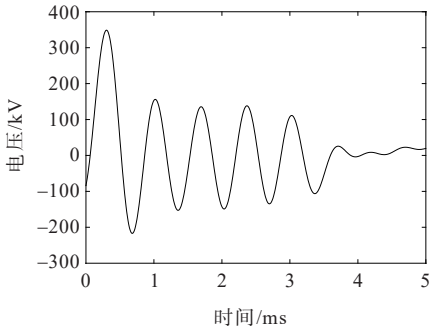

图13 光伏接入的输出电压波形

Figure 13 Output voltage waveform with photovoltaic access

由图12、13可知，自定义电压源模型的拟合情况基本契合仿真波形。

3.2.2 线路建模

考虑暂态过程中电压波的高频特性，本文在电磁暂态仿真程序ATP-EMTP导线模型中选择LCC板块中能反映频率特性的JMarti模型[28]，导线参数按LGJ-35确定。

3.2.3 避雷器建模

避雷器非线性电阻的模拟要求其伏安特性一致，或者可用折线替代实际曲线。MOA的电流和电压满足以下关系：

$$i = p\left(\frac{u}{U_{\mathrm{ref}}}\right)^{q} \tag{3}$$

式中，p、q 均为常数（典型值为 20～30）；U_{ref} 为参考电压，一般取额定电压或接近额定电压的值。用一个指数函数来表示金属氧化锌避雷器阀片电阻的非线性特性情况是比较难的，在 ATP-EMTP 中一般用分段指数函数模型来表示，它将电压的范围分为几段，且每段都有各自的指数函数[29]。避雷器非线性特性如图 14 所示。

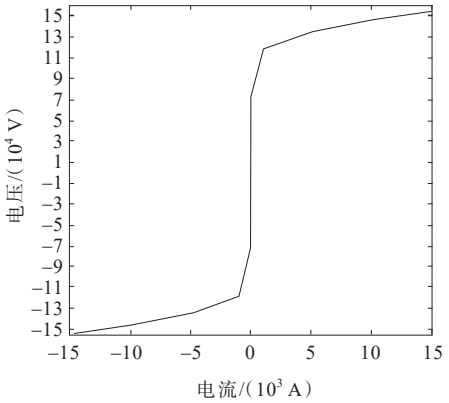

图 14　避雷器非线性特性

Figure 14　Nonlinear characteristics of lightning arrester

3.2.4　整体模型确立

在 ATP-EMTP 中建立避雷器承受自定义电压模型如图 15 所示。

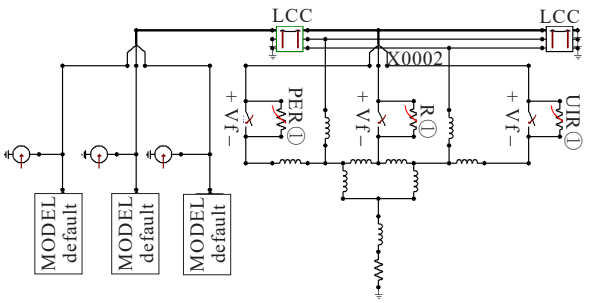

图 15　避雷器承受自定义电压模型

Figure 15　Model of lightning arrester withstanding custom voltage

3.3　结果分析

为了检验光伏接入后 MOA 的承受能力，需要给出 MOA 安全运行的判定阈值。根据 IEC 60099-4 避雷器分级及能量耐受标准的要求，为使配电用 MOA 不发生热崩溃，其热电荷传送值 $Q_{\mathrm{th}} \leqslant 0.7$ C。

热电荷传送值 Q_{th} 的计算方法为

$$Q_{\mathrm{th}} = \int_{0}^{t} I_{(t)}\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中，Q_{th} 为热电荷传送值；$I(t)$ 为雷电流幅值随时间变化的函数[30]。

光伏未接入时，MOA 上流过的电流波形及由该电流波形得到的热电荷传送值如图 16 所示。

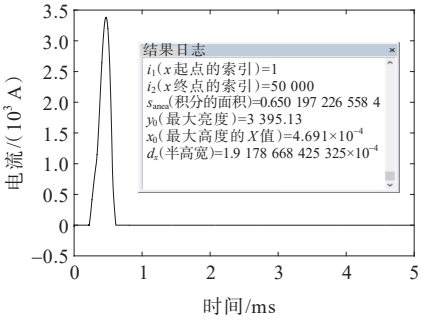

图 16　光伏接入前避雷器热电荷传送值

Figure 16　Thermal charge transfer value of lightning arrester before photovoltaic access

根据图 16 可知，光伏接入前，系统中发生不同电压等级之间短时碰线的 MOA 热电荷传送值为 0.65 C，小于 MOA 标准规定的 0.70 C。因此在该情况下，MOA 一般不会发生热崩溃。

光伏接入后，避雷器上流过的电流波形及由该电流波形得到的热电荷传送值如图 17 所示。

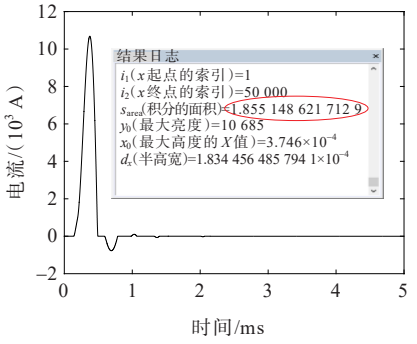

图 17　光伏接入后避雷器热电荷传送值

Figure 17　Thermal charge transfer value of lightning arrester after photovoltaic access

由图 17 可知，光伏接入后系统发生不同电压等级短时碰线的避雷器热电荷传送值为 1.855 C，远大于规定的 0.7 C。因此在该情况下避雷器会发生热崩溃。该结果是以变电站典型实际避雷器故障案例为依据进行仿真计算得出的，澄清了在光伏接入前、后避雷器故障的原因。

4　结语

本文建立了光伏接入模型，并通过 ATP-

EMTP仿真模拟了光伏接入前、后并网点电压施加在避雷器两端时，避雷器热电荷传送值进行了对比分析，得出如下结论。

1）当光伏未接入该系统时，短路故障将使较低电压等级的母线电压升高；短路故障消失后，母线上的电压将出现一个持续时间较短的暂态过程，在此暂态过程中，电压将会陡增，随后将出现波动衰减。

2）光伏系统接入系统之前，避雷器动作期间吸收的热电荷传送值低于国际标准的规定值，而光伏系统接入系统以后，避雷器动作期间吸收的热电荷传送值远远超过国际标准的规定值，极大地增加了避雷器爆炸的概率。

3）基于上述分析，本文建议在包含光伏发电系统、风力发电系统等包含较多电力电子器件的配电网中，将并网点母线附近的普通避雷器替换为通流容量更大的新型避雷器。

参考文献：

[1] 韩宇，周前，李勇，等．户用光伏接入的低压配电网电能质量问题分析与附加损耗量化评估[J]．电力科学与技术学报，2024，39(3)：177-186.
HAN Yu, ZHOU Qian, LI Yong, et al. Analysis of power quality issues and quantitative evaluation of additional losses in low voltage distribution networks connected to household photovoltaics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 177-186.

[2] 张锐，饶欢，徐睿烽，等．多运行目标下的分布式光伏接入配电网极限容量多模型评估方法[J]．电力科学与技术学报，2023，38(4)：143-150.
ZHANG Rui, RAO Huan, XU Ruifeng, et al. An evaluation method for the maximum distributed photovoltaic power capacity absorbed in the distribution networks considering multiple operation targets[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 143-150.

[3] 刘杨华，杨悦荣，林舜江．含光伏配电网中储能和无功补偿装置协调的多目标凸优化配置方法[J]．电力科学与技术学报，2023，38(5)：22-33.
LIU Yanghua, YANG Yuerong, LIN Shunjiang. A multi-object convex optimization method for the coordinated allocation of energy storage and reactive power compensation devices in distribution network integrated with photovoltaics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 22-33.

[4] 甘艳，黄菁雯，吴军，等．含风电光伏电力系统概率潮流计算改进方法研究[J]．电力科学与技术学报，2023，38(5)：34-43.
GAN Yan, HUANG Jingwen, WU Jun, et al. Research on probabilistic power flow calculation improvement method of power system including wind and photovoltaic power generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 34-43.

[5] 缪惠宇，史明明，费骏韬，等．计及综合能源系统接入影响的配电网可靠性评估方法[J]．电测与仪表，2022，59(10)：23-31.
MIAO Huiyu, SHI Mingming, FEI Juntao, et al. Reliability assessment method of distribution network considering the impact of integrated energy system access[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(10): 23-31.

[6] 吕泉，Aamir Saeed，杨丹霞，等．计及合理弃光的含储能配电网分布式光伏最大接入容量评估方法[J]．电网与清洁能源，2023，39(5)：120-127.
LYU Quan, SAEED A, YANG Danxia, et al. A method of photovoltaic hosting capacity evaluation for distribution systems with energy storage systems considering rational photovoltaic curtailment[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 120-127.

[7] 蔡绍荣，沈力，江栗，等．考虑水风光互补与机会约束的电力系统源网荷协调扩展规划研究[J]．电网与清洁能源，2022，38(11)：134-145.
CAI Shaorong, SHEN Li, JIANG Li, et al. A study on source-network-demand coordinated expansion planning of the power system considering hydro-wind-solar complementary and chance constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 134-145.

[8] 叶圣永，王晓茹，周曙，等．基于马尔可夫链蒙特卡罗方法的电力系统暂态稳定概率评估[J]．电工技术学报，2012，27(6)：168-174.
YE Shengyong, WANG Xiaoru, ZHOU Shu, et al. Power system probabilistic transient stability assessment based on Markov chain Monte Carlo method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 168-174.

[9] 鲁广明，张璐路，马晶，等．基于时序特征选择与改进MSPCA算法的电网暂态稳定态势智能评估[J]．电测与仪表，2023，60(6)：125-133.
LU Guangming, ZHANG Lulu, MA Jing, et al. Intelligent transient stability situation assessment of powergrid based on time-series feature selection and improved MSPCA algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(6): 125-133.

[10] 杨婧颖，王武林，张明敏，等．考虑分布式光伏和储能参

与的配电网电压分层控制方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(5):111-120+215.
YANG Jingying, WANG Wulin, ZHANG Mingmin, et al. Voltage hierarchical control method of distribution network considering distributed photovoltaic and energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(5):111-120+215.

[11] 姚璐勤,王琦,李妍,等.计及设备损耗成本的含光储配电网分布式电压控制策略[J].电力工程技术,2023,42(6):52-63.
YAO Luqin, WANG Qi, LI Yan, et al. Distributed voltage control strategy of distribution network with photovoltaic and energy storage considering equipment loss cost[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 52-63.

[12] 林泽源,王宗尧,张凡,等.考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法研究[J].高压电器,2024,60(7):78-87.
LIN Zeyuan, WANG Zongyao, ZHANG Fan, et al. Research on optimization method for energy storage capacity configuration in photovoltaic DC micro grid considering hydrogen energy application[J]. High Voltage Apparatus,2024,60(7):78-87.

[13] 李克强,韩学山,李华东,等.配网中光伏逆变器最优潮流追踪的分布式算法[J].中国电机工程学报,2019,39(3):711-720+950.
LI Keqiang, HAN Xueshan, LI Huadong, et al. Distributed algorithm for optimal power flow pursuit by photovoltaic inverters in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(3):711-720+950.

[14] 胡迪,丁明,毕锐,等.光伏和风电互补性对高渗透率可再生能源集群接入规划影响分析[J].中国电机工程学报,2020,40(3):821-836.
HU Di, DING Ming, BI Rui, et al. Impact analysis of PV and WT complementarity on access planning of high penetrated renewable energy cluster[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(3):821-836.

[15] 姚宏民,杜欣慧,李廷钧,等.光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J].电网技术,2019,43(2):462-469.
YAO Hongmin, DU Xinhui, LI Tingjun, et al. Simulation of consumption capacity and voltage control strategy of distribution network with high penetration of photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 462-469.

[16] 郭威,张凯,魏新杰,等.高渗透率分布式光伏接入的新型电力系统净功率预测[J].电测与仪表,2022,59(12):48-55.
GUO Wei, ZHANG Kai, WEI Xinjie, et al. Net power prediction for a novel power system with high permeability distributed photovoltaic access[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(12):48-55.

[17] 向川,畅昶,周鑫,等.大规模新能源并网下SVG协同风电场的电压精细化控制策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(5):61-71.
XIANG Chuan, CHANG Chang, ZHOU Xin, et al. Research on meticulous voltage cooperative control strategy between SVG and wind farm under the integration of large-scale renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 61-71.

[18] 赵建勇,张震霄,丁元杰,等.基于电力电子调压器的配电网电压协调控制策略[J].电气传动,2022,52(7):50-56.
ZHAO Jianyong, ZHANG Zhenxiao, DING Yuanjie, et al. Voltage coordinated control strategy in distribution network based on power electronic voltage regulator[J]. Electric Drive,2022,52(7):50-56.

[19] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.

[20] 陈炜,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26-32+39.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32+39.

[21] 毕天姝,刘素梅,薛安成,等.逆变型新能源电源故障暂态特性分析[J].中国电机工程学报,2013,33(13):165-171.
BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault characteristics of inverter-interfaced renewable energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 165-171.

[22] 艾欣,雷之力,崔明勇.微电网谐波谐振的模态检测法研究[J].中国电机工程学报,2009,29(增刊1):55-60.
AI Xin, LEI Zhili, CUI Mingyong. Study on modal survey method of the harmonic resonance in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(sup 1):55-60.

[23] 仰彩霞.基于模态分析法的电力系统谐波谐振问题研究及其灵敏度分析[D].武汉:武汉大学,2010.
YANG Caixia. Application of modal analysis on harmonic resonance problem and its sensitivity analysis in power system[D]. Wuhan: Wuhan University,2010.

[24] 张佳佳,陈金富,范荣奇.微网高渗透对电网稳定性的影

响分析[J].电力科学与技术学报,2009,24(1):25-29.
ZHANG Jiajia, CHEN Jinfu, FAN Rongqi. Investigation of the influence of microgrids high large penetration ratios on power network stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2009,24(1):25-29.

[25] 蒋凌峰.10 kV架空线路用单相并联间隙的型式设计及绝缘配合研究[D].长沙:长沙理工大学,2022.
JIANG Lingfeng. The research on type design and insulation coordination of single phase parallel gap for 10 kV overhead transmission lines[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2022.

[26] 马永翔,王一君,闫群民,等.局部阴影下光伏阵列的MPPT综合优化[J].现代电子技术,2019,42(11):140-143+148.
MA Yongxiang, WANG Yijun, YAN Qunmin, et al. MPPT synthetic optimization of photovoltaic array in partial shadow[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(11): 140-143+148.

[27] 黄滔滔,荣娜.基于DIgSILENT的光储联合系统作为地区电网黑启动电源可行性研究[J].电网与清洁能源,2022,38(2):94-101.
HUANG Taotao, RONG Na. A feasibility study on black start strategy for the regional power grid with PV-BESS based on DIgSILENT[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(2):94-101.

[28] 杨鑫,祝欢欢,钟淼龙,等.并联间隙在10 kV配电线路的单相安装方式[J].电网技术,2020,44(8):3164-3171.
YANG Xin, ZHU Huanhuan, ZHONG Miaolong, et al. Single-phase installation method of parallel gap in 10 kV distribution line[J]. Power System Technology, 2020, 44 (8):3164-3171.

[29] 江海英.新密矿区35 kV电网防雷计算分析[D].焦作:河南理工大学,2014.
JIANG Haiying. Lightning protection calculation and analysis of 35 kV power grid of Xin-mi mining area[D]. Jiaozuo:Henan Polytechnic University,2014.

[30] 蒋凌峰,杨鑫,吴文锋,等.10 kV架空线路和配电变压器绝缘水平差异的调节方法[J].电瓷避雷器,2022(2):20-30.
JIANG Lingfeng, YANG Xin, WU Wenfeng, et al. Adjustment method for the difference of insulation level between 10 kV overhead line and distribution transformer[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 20-30.