

时间反演技术在低压脉冲电缆故障定位中的应用

沈智飞, 王娟, 柳宝坤, 张恒伟, 黄玉兰, 潘仁勇

(尚纬股份有限公司, 四川 乐山 614012)

摘要: 低压脉冲法可以有效定位电缆中故障点, 并对故障点类型做出判断。但是传统的低压脉冲法需要人为干预分离脉冲和存在无法直观确定故障点位置等问题。为解决该问题, 提出将时间反演技术用于低压脉冲电缆故障定位。首先, 介绍了该方法的原理并阐述了相关计算步骤; 然后, 通过仿真证明了该方法可以在无需人为识别脉冲的前提下有效确定电缆中的故障点, 并对该故障进行类别辨识; 最后, 在实验室中对 105 m 交联聚乙烯电缆制作局部缺陷并用所提方法进行测试。实测结果证明了时间反演技术用于低压脉冲电缆故障定位的可行性和有效性。

关键词: 电力电缆; 故障定位; 低压脉冲; 时间反演

中图分类号: TM 935 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2021)04-0085-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210417

Application of Time Reversal Technology to Fault Location of Low-voltage Pulse Cable

Shen Zhifei, Wang Juan, Liu Baokun, Zhang Hengwei, Huang Yulan, Pan Renyong

(Sunway Co., Ltd., Leshan 614012, Sichuan, China)

Abstract: The low-voltage pulse method can effectively locate the fault in the cable and judge the type of the fault. The traditional low-voltage pulse method needs to separate the pulse artificially, and it is difficult to directly locate the fault in the cable. In order to solve this problem, the time reversal technology is introduced in low-voltage pulse method for locating the fault. Firstly, the principle of the proposed method is introduced and its calculation process are given. And then, the simulation results prove that the proposed method can effectively locate the fault in the cable and judge the type of the fault without human intervention. Finally, in the laboratory, the proposed method is tested in a 105 m XLPE cable with a local defect. The measurement results confirm the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: power cable; fault location; low-voltage pulse; time reversal

0 引言

随着中国城市电网的发展, 交联聚乙烯(XLPE)电力电缆因其优良的电气性能和机械性能开始被大规模投入城市电网中^[1-2]。大部分 XLPE 电力电缆长期处于地下的恶劣环境中, 在水分、电场、机械损伤和化学腐蚀的作用下, XLPE 电力电缆会在局部位置形成缺陷或者接地故障, 进而影响电网的正常运行^[3-4]。因此快速准确定位 XLPE 电力电缆的故障点对于保证城市电网的稳定运行有着重大意义^[5-6]。

阻抗法故障定位借助电缆的集中参数模型, 在测出电缆线路的电压电流值后, 建立故障距离求解方程, 进而得到电缆的故障位置^[7]。该方法必须保证整个电缆线路的分布参数一致以及引线接触要求高, 因此该方法难以在实际工程中确定故障点位置。

低压脉冲法故障定位借助行波在电缆中的传播和反射特性定位电缆中故障点。低压脉冲的时间延迟可用于判断故障位置, 低压脉冲的极性可用于判断故障类别^[8]。该方法拥有着操作简单和设备便携的优点, 因此被广泛使用到电缆的故障定位中。但是目前的低压脉冲方法存在需要人为干预分离脉冲和无法直观确定故障点位置等问题。时间反演

(time reversal, TR) 技术^[9-10]是通过将测试端的测试信号进行时间反演后再注入原观测系统,借助原观测系统的传递函数,实现了信号的空间聚焦现象^[11]。因此将 TR 技术用在低压脉冲法中,可以通过检测电缆中不同位置的信号的空间聚焦现象来有效地确定电缆中故障点位置,借此解决原有低压脉冲法中需要人为干预脉冲分离和无法直观定位故障点的问题。

下面将时间反演技术结合低压脉冲法来实现电缆的故障定位并进行验证。

1 技术原理

1.1 低压脉冲法

当高频电压波在电缆中传输时,电缆不能再使用集中参数进行表示,而是要使用如图 1 所示的分布参数表示^[12]。图 1 中, R 、 L 、 G 、 C 分别表示电缆单位长度 Δx 的电阻 (Ω/m)、电感 (H/m)、电导 (S/m) 和电容 (F/m), 其值可由式 (1) 至式 (4) 计算得到^[12-13]。

$$R \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (1)$$

$$L \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} + \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2\mu_0}{\omega}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (2)$$

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_s/r_c)} \quad (3)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_s/r_c)} \quad (4)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$; r_c 和 r_s 分别为电缆缆芯半径和屏蔽层内半径; ρ_c 和 ρ_s 分别为电缆的缆芯和屏蔽层电阻率; σ 和 ϵ 分别为电介质的电导率和介电常数。

借此确定电缆的特性阻抗 Z_0 为

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (5)$$

当电缆中出现故障时,故障位置处的特性阻抗会发生变化,造成行波在该位置的反射现象,这导致首端的反射波携带了电缆故障位置处的状态信息。反射波的幅值和极性取决于故障位置处的反射系数 ρ , 即

$$\rho = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \quad (6)$$

式中: Z_i 为故障处的特性阻抗; Z_0 为电缆本体特性阻抗。

低压脉冲法的测试如图 2 所示。该方法首先往电缆中注入脉冲信号,当脉冲信号遇到电缆中故障造成的阻抗不连续点时,此时会产生反射脉冲 P_x 。由于 P_x 包含距首端 x 处电缆的局部阻抗信息,因此可以通过分析 P_x 来定位故障和判断故障类别。即通过确定反射脉冲的时间来定位电缆中故障点,然后通过反射脉冲的极性确定该位置的阻抗变化类型。但是现有的低压脉冲法技术需要人为判断各脉冲是故障点反射造成的还是末端反射造成的,即现有方法存在需要人为干预分离脉冲和无法直观确定故障点位置等问题。为解决相应问题,引入 TR 技术结合低压脉冲法实现电缆故障的快捷方便定位。

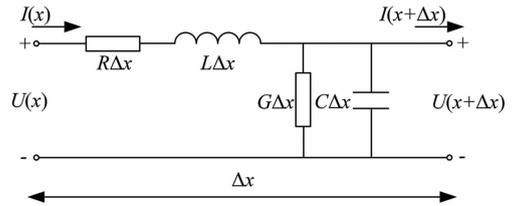


图 1 电缆分布参数等效电路

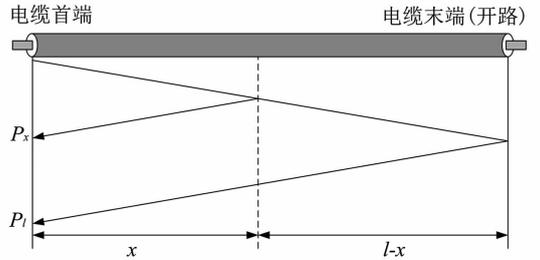


图 2 低压脉冲法测试

1.2 时间反演技术在低压脉冲法的应用

考虑低压脉冲法中被测电缆的冲击响应时域函数为 $h_1(t)$, 当注入时域信号 $f(t)$ 时, 得到系统的时域响应信号 $y_1(t)$ 为

$$y_1(t) = f(t) * h_1(t) \quad (7)$$

式中, * 为卷积运算。

将系统的时域响应信号进行时间反演处理, 得到处理后的时域信号 $y_1(-t)$, 将其注入缺陷位置不同的电缆无损镜像模型中, 得到电缆无损镜像模型的时域响应信号 $y_2(t, d)$ 为

$$\begin{aligned} y_2(t, d) &= y_1(-t) * h_2(t, d) \\ &= f(-t) * h_1(-t) * h_2(t, d) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $h_2(t, d)$ 为假设缺陷位置在距首端 d 处的电缆无损镜像模型的冲击响应时域函数。

由式(8)可知,当 d 为真实缺陷位置时, $y_2(t, d)$ 会出现波形的空间聚焦现象,其能量会达到极值,借此可以确定真实故障点位置,因此定义反演波形能量 $E(d)$ 为

$$E(d) = \int_0^T y_2^2(t, d) dt \quad (9)$$

式中, T 为反波波形的总时长。

利用电缆的传递函数构建电缆无损镜像模型,即假设缺陷位置在距首端 d 处的电缆无损镜像模型传递函数 $H_2(f, d)$ 为

$$H_2(f, d) = e^{-2j\beta d} + e^{-2j\beta l} \quad (10)$$

式中: f 为频率; l 为电缆总长; β 为相位常数,可以表示为

$$\beta = \frac{2\pi f}{v} \quad (11)$$

式中, v 为电缆中电磁波波速。

综上所述,所提的基于时间反演的低压脉冲电缆故障定位技术包括以下 2 个步骤:

- 1) 在被测电缆的首端注入低压脉冲,在首端测得电缆的响应波形 $y_1(t)$, 并对其进行时间反演;
- 2) 在缺陷位置不同的电缆无损镜像模型的首端注入步骤 1 中时间反演后的波形,检测其波形能量,当波形能量达到极值时,缺陷位置得到确定。

1.3 入射信号的选取

在确定低压脉冲法的定位方法之后,接着需要确定低压脉冲法的测试原始波形,采用文献[14]中的高斯脉冲波作为测试波形,其具体形式为

$$s(t) = ae^{-(t-b)^2/2c^2} \quad (12)$$

式中: a 为信号幅值控制系数; b 为信号时间控制系数; c 为信号时宽控制系数。

对 $s(t)$ 进行傅里叶变换,得到其幅频函数为

$$\text{abs}(S(f)) = a \sqrt{2c^2 \pi e} \frac{e^{-\frac{f^2}{2(\frac{1}{2\pi c})^2}}}{2(\frac{1}{2\pi c})^2} \quad (13)$$

实际测试得到的 $s(t)$ 为离散信号,因此进一步得到其幅频函数为

$$\text{abs}(S(f)) = f_s a \sqrt{2c^2 \pi e} \frac{e^{-\frac{f^2}{2(\frac{1}{2\pi c})^2}}}{2(\frac{1}{2\pi c})^2} \quad (14)$$

从式(14)中可以看出是 $s(t)$ 的频率分量只与 c 相关,不同 c 值下具体时域和频域分布结果如图 3 所示。从图中可以看出当 c 值变小时,时域上 $s(t)$ 的时宽逐渐变小,频域上 $s(t)$ 的高频成分含量逐渐

增加,低频成分含量逐渐减少。

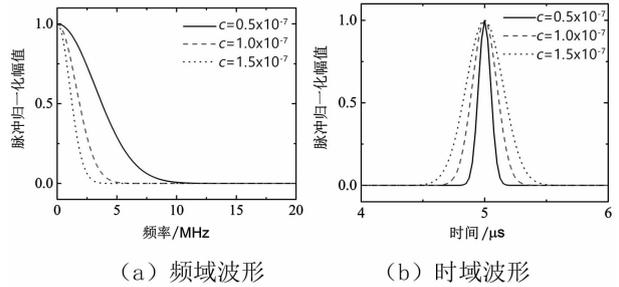


图 3 高斯脉冲时频域分析

图 4 为某 10 kV 电力电缆的衰减系数实际测试结果,从图 4 中可以看出随着频率的增加,衰减系数逐渐增加,说明了在电缆中高频成分衰减较快。对于长电缆而言,应该增加 c 值,使信号中的低频成分含量增加,高频分量成分减少,保证信号在电缆中稳定传输并在首端能成功采集到电缆中的反射波。从图 3 中可以看出,此时信号的时宽会增加,导致电缆中反射波的分辨率下降。对于短电缆而言,由于长度较短,高频信号的衰减程度有限,因此可以减少 c 值,使信号含有较多高频成分,缩减信号的时宽,提高电缆中反射波的分辨率,有利于识别电缆中的缺陷。

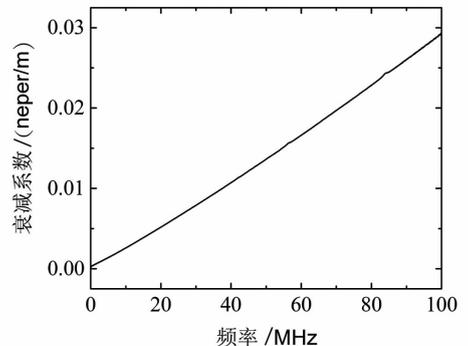


图 4 电缆中信号衰减系数

2 仿真分析

选用如图 5 所示电缆中常见的过渡电阻接地故障进行所提方法的仿真故障定位测试。该模型中,接地电阻 R_g 设置为 500 Ω , 电缆总长 l 为 200 m,故障位置距首端距离 x 为 120 m。该电缆模型选择为 10 kV 的 XLPE 电缆,具体参数如表 1^[12-13] 所示。

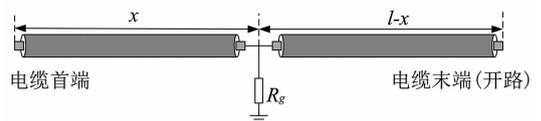


图 5 电力电缆故障仿真模型

表 1 电缆模型参数

参数	数值
r_c/mm	4
r_s/mm	9.5
$\rho_c/(\mu\Omega \cdot \text{mm})$	17.5
$\rho_s/(\mu\Omega \cdot \text{mm})$	17.5
$\sigma/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	1×10^{-16}
$\varepsilon/(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	2.04×10^{-11}

该仿真测试中低压脉冲测试波形可以通过式(15)给出。

$$y_1(t) = \text{IFFT} \left\{ \text{FFT}(s(t)) \frac{Z_x - Z_0}{Z_x + Z_0} e^{-2\gamma x} \right\} \quad (15)$$

式中: Z_x 为从 x 处看进去的电缆首端阻抗,其模型可以从文献[15]得到;IFFT为快速傅里叶反变换;FFT为快速傅里叶变换; $s(t)$ 为测试信号的时域波形。

通过仿真得到该模型的低压脉冲测试波形如图6所示。在图6中,无法直接确定各反射脉冲是末端反射造成还是故障点反射造成的,亦或是多次反射造成的,即无法直接确定各反射脉冲的对应关系。传统的低压脉冲法此时需要人为干预分离脉冲后,再结合电缆的波速来确定电缆中的故障点,操作较为复杂,无法直观确定电缆的故障位置。

通过所提方法对图6中数据进行处理,处理结果如图7所示。从图7中可以明显看出,所得到的反演波形的能量曲线在130 m处存在一处极值,即定位到故障点距离;同时该极值为极小值,即130 m存在局部阻抗变小的故障,和实验设置一致,证明了所提方法可以有效处理低压脉冲法的测试结果,准确定位电缆中故障点,并对故障点类别进行辨识。

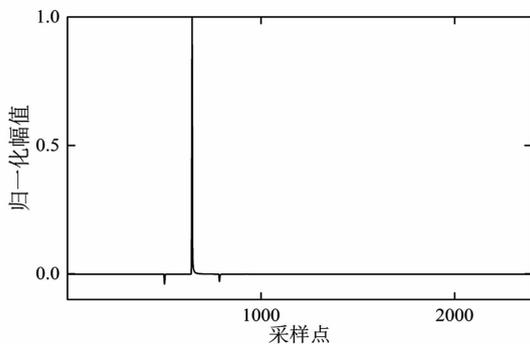


图 6 低压脉冲法仿真测试结果

3 实测算例

在105 m长的10 kV XLPE电缆上进行实际测试。该电缆在距首端43 m处剥离外护套,并用饱和食盐水进行浸泡一段时间,待电缆铜屏蔽层产生铜

绿后停止浸泡,以模拟现实情况中电缆外护套破损造成铜屏蔽层腐蚀的缺陷。采用低压脉冲法对该电缆进行测试,测试系统如图8所示,信号发生装置根据电缆长度发射适宜的高斯脉冲波,然后信号采集装置采集反射波数据,得到测试结果如图9所示。

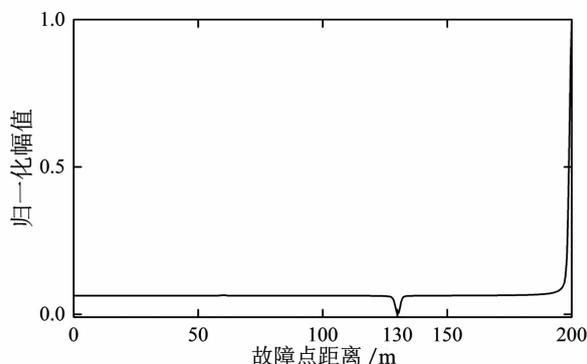


图 7 仿真中时间反演处理结果

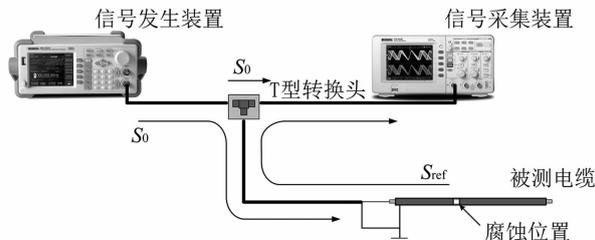


图 8 低压脉冲法实际测试

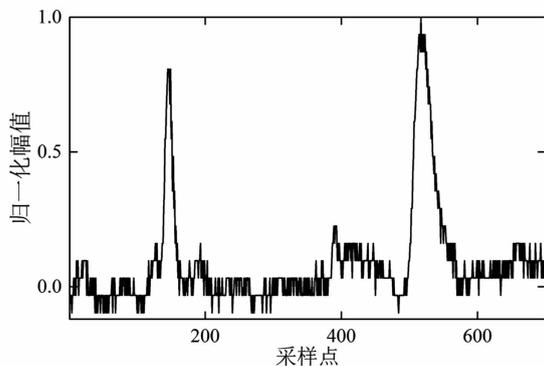


图 9 低压脉冲法实际测试结果

从图9中可以看出,针对低压脉冲法而言,直接的测试结果无法直观判断出故障位置,需要先人为进行脉冲识别,即确认各脉冲是故障反射还是电缆末端反射造成的。另一方面,从图9中还可以看出,由于采样设备垂直分辨率的影响,其低压脉冲法中脉冲峰值难以确定,因此难以有效确定缺陷的位置。

利用时间反演技术处理低压脉冲法测试结果,得到反演波形的能量波形如图10所示。从图10中可以看出在43 m处存在一个明显的极大值,既直观定位到电缆缺陷,又说明了该缺陷是局部特性阻抗增大的缺陷,即同时表明了缺陷类别。该实例成功

说明了所提方法可以有效处理低压脉冲法的测试结果,无需人为进行脉冲识别即可完成缺陷的定位和类别辨识。

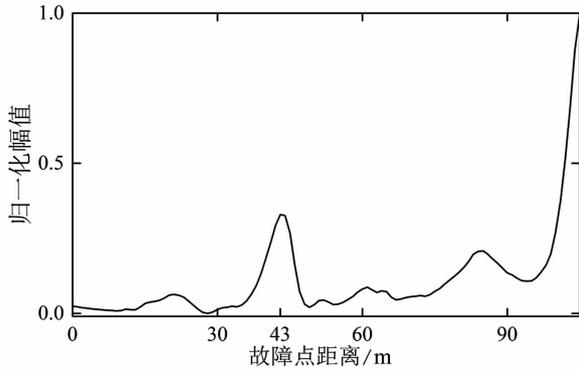


图10 实测中时间反演处理结果

4 结 语

前面将时间反演技术用于低压脉冲电缆故障测试中,解决了原有方法需要人为干预分离脉冲和无法直观确定故障点位置等问题。仿真结果表明,所提方法可以在无需人为识别脉冲的前提下有效确定电缆中的故障点,并对该故障进行类别辨识。实测结果也表明,所提方法可以有效定位真实电缆中故障点,并且受采样设备垂直分辨率的影响较小。

参 考 文 献

[1] 饶显杰,周凯,李明志,等. 基于电力电缆绝缘去极化电流的扩展 Debye 等效电路参数辨识[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 1037 - 1043.

[2] 周凯,陈泽龙,李天华,等. 运行老化 XLPE 电缆导体屏蔽层侧绝缘缺陷分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 187 - 194.

[3] 袁燕岭,李世松,董杰,等. 电力电缆诊断检测技术综述[J]. 电测与仪表, 2016, 53(11): 1 - 7.

[4] 唐忠,杨建. 交叉互联电缆行波故障测距的研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(5): 64 - 69.

[5] 谢敏,周凯,赵世林,等. 新型基于反射系数谱的电力电缆局部缺陷定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3083 - 3089.

[6] Shi Q, Kanoun O. A New Algorithm for Wire Fault Location Using Time - domain Reflectometry[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(4): 1171 - 1178.

[7] 黄振峰,袁大海,毛汉领,等. 电力电缆绝缘损伤的非线性辨识及故障定位[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(5): 1747 - 1755.

[8] 李露. 船用电力电缆故障诊断的仿真研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.

[9] Abboud L, Cozza A, Pichon L. A Matched - pulse Approach for Soft - fault Detection in Complex Wire Networks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(6): 1719 - 1732.

[10] Razzaghi R, Lugrin G, Manesh H M, et al. An Efficient Method Based on the Electromagnetic Time Reversal to Locate Faults in Power Networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1663 - 1673.

[11] Fink M, Prada C. Acoustic Time - reversal Mirrors[J]. Inverse Problems, 2001, 17(1): R1 - R38.

[12] 谢敏,周凯,赵世林,等. 考虑相速度频变特性的改进互相关算法局部放电定位[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1661 - 1667.

[13] 谢敏,周凯,何珉,等. 基于时间反演技术的电力电缆局部放电定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3402 - 3409.

[14] 饶显杰,周凯,谢敏,等. 基于频域反射法的特征时域波形恢复技术[J/OL]. 高电压技术: 1 - 7[2020 - 10 - 25]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200570729>.

[15] 周志强. 基于宽频阻抗谱的电缆局部缺陷诊断方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.

作者简介:

沈智飞(1981),男,硕士,高级工程师,从事输电电缆生产方面的工作。(收稿日期:2021-03-27)

=====

(上接第42页)

[14] 王伟,李开成,许立武,等. 基于一维卷积神经网络多任务学习的电能质量扰动识别方法[J/OL]. 电测与仪表:1 - 10[2021 - 04 - 14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210114.1618.006.html>.

[15] 王挺韶,季天瑶,姜雨滋,等. 基于降噪自动编码器与一维卷积网络的风机故障诊断方法[J/OL]. 电测与仪表:1 - 9[2021 - 04 - 14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201222.1503.009.html>.

[16] 何成兵,王润泽,张霄翔. 基于改进一维卷积神经网络

的汽轮发电机组轴系扭振模态参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增1): 195 - 203.

[17] 杨德友,邵致远,王博. 基于动态模式分解的发电机惯量及阻尼系数评估方法[J/OL]. 电网技术:1 - 10[2021 - 04 - 15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20210412.1546.009.html>.

作者简介:

齐放(1983),男,硕士研究生,从事电力系统运行与运营工作。(收稿日期:2021-04-27)