

开关电感级联型高倍升压 AC-DC 变换器

李咏秋, 杨喜军

(上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要:针对电感并联充电、串联放电的升压原理,提出一种开关电感级联型高倍升压 AC-DC 功率变换器。通过该变换器工作原理理论分析、IR1155S 芯片单周期控制理论参数计算和仿真与实验验证的方法,对该 AC-DC 功率变换器的功率因数校正性能、高倍升压能力进行理论分析与实验验证。研究表明:所研究的开关电感级联型高倍升压 AC-DC 功率变换器具有良好的功率因数校正性能、高倍升压能力与运行安全稳定性,为高倍升压 DC-DC 变换器和 AC-DC 变换器提供了一种解决方案。

关键词:功率变换器;功率因数校正;级联连接;单周期控制;开关电感

中图分类号:TM461 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22493

Switched Inductor Multi-cascaded High Transfer-ratio Boost AC-DC Converter

LI Yongqiu, YANG Xijun

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the Boost principle of inductor parallel charging and series discharging, a switched inductor cascade connection high transfer-ratio Boost AC-DC power converter was proposed. The electric power factor correction performance and high-power Boost capability of the AC-DC converter were analyzed and verified by the methods of the operating analysis, IR1155S one cycle control (OCC) theoretical parameter calculation and experimental research. The results show that the switched inductor multi-cascaded high transfer-ratio Boost AC-DC power converter has good electric power factor correction performance, strong step-up capability and operation safety and stability, which provides a solution for high-power Boost DC-DC converters and AC-DC converters.

Key words: power converters; electric power factor correction; cascade connections; one cycle control (OCC); switched inductor

单相二极管整流桥后置非隔离升压型 DC-DC 变换器,可构成单相功率因数校正器,其中升压电感的工作模式包括连续导电模式 (continuous conduction mode, CCM)、临界导电模式 (critical conduction mode, CRM) 和断续导电模式 (discontinuous conduction mode, DCM)。鉴于传统升压型 DC-DC 变换器的升压能力一般不大于 4~5 倍,交流电压源供电的有桥型或无桥型单相功率因数校正器^[1-3]的升压能力一般为网压峰值的 1~2 倍,否则占空比过大会影响升压变换器的稳定性和可控性。某些需要高压的应用场合,如 X 射线医疗或工业、高压装置绝缘测试、静电除尘等,需

要二次升压变换,因此存在电路结构复杂和整机效率较低等实际问题。

非隔离升压型 DC-DC 变换器包括传统两电平、三电平以及高倍升压型等多种构成方式,高倍升压型 DC-DC 变换器又包括开关电感型^[4-5]、开关电容型^[6-8]以及级联升压型^[9-11]等多种构成方式,具有很强的升压能力。基于高倍升压型 AC-DC 变换器的单相功率因数校正器,在输入低压时可以获得高压直流输出,同时获得网侧较高功率因数,功率开关可工作在较低占空比而不会造成控制不稳。

本文继续对文献[4-5]给出的开关电感型高

作者简介:李咏秋(1999—),女,本科,Email:qq0741@sjtu.edu.cn

通讯作者:杨喜军(1964—),男,博士,副教授,Email:yangxijun@sjtu.edu.cn

倍升压变换器进行跟踪研究,根据其工作原理为升压电感处于并联充电、串联放电状态并结合级联升压型变换器的结构特点,提出一种新型开关电感级联型高倍升压AC-DC变换器,级联数不受限制。采用单周期模拟控制器IR1155S控制并进行关键参数计算,最后进行仿真与实验验证。

1 高倍升压电路工作原理

1.1 功率电路分析

由文献[4],可以得到一种开关电感型高倍升压AC-DC变换器,如图1a所示。该电路的特点是:升压电感数量为2个,可控功率开关数量为1个,功率二极管数量为4个,且 D_5, D_6 与 D_8 为反向快速恢复型,整流桥与输出电压共地,驱动器与驱动电源数量均为1个,可以采用现有模拟控制器。现有模拟控制器带有非隔离驱动器,支持较高的开关频率,无需隔离电量检测。功率二极管 D_7 可以为反向慢速恢复型二极管。

文献[5]给出了一种开关电感型高倍升压AC-DC变换器,如图1b所示。该电路的特点是:升压电感数量为2个,可控功率开关数量为2个,功率二极管数量为1个且为反向快速恢复型二极管,整流桥与输出电压异地,驱动器与驱动电源数量均为2个,可采用数字控制器,需要额外高速隔离驱动器,需要隔离电量检测。

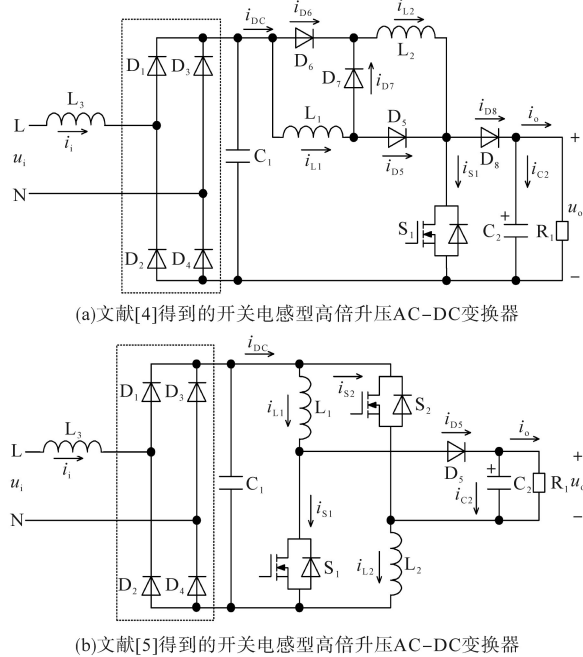


图1 文献[4-5]得到的开关电感级联型高倍升压AC-DC变换器
Fig.1 Switched inductor based high transfer-ratio Boost AC-DC converters obtained from reference [4-5]

图1所示电路结构比较简单和易于实现,但是不具备级联结构,均不能推导出更高倍升压结构,且图1b所示电路在电感量不等而两个开关同时开断时,会产生超高浪涌电压。利用升压电感并联充电和串联放电升压的基本原理,本文提出如图2所示的高倍升压单相AC-DC变换器,图中给出了三级升压结构,理论上只有最后一级结构中的功率二极管 D_9 和 D_{10} 需要采用反向快速恢复型二极管。

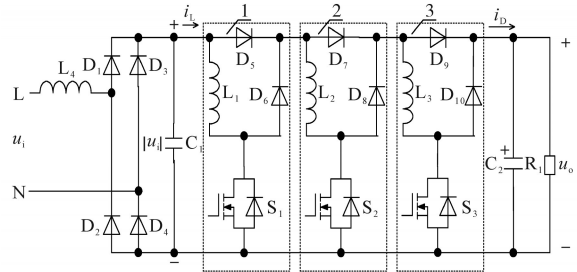


图2 开关电感级联型高倍升压AC-DC变换器
Fig.2 Switched inductor multi-cascaded high transfer-ratio Boost AC-DC converter

1.2 升压原理分析

1.2.1 感量相等

在图2中,当功率开关 $S_1 \sim S_3$ 导通时,二极管 D_5, D_7 压降较小,功率开关 $S_1 \sim S_3$ 的导通压降相近,因此升压电感 $L_1 \sim L_3$ 端电压近似相等,并联充电,升压电感电流上升斜率为

$$\frac{di_{Lk}}{dt} = \frac{|u_i|}{L_k} > 0 \quad k = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中: u_i 为输入电压。

电感电流上升斜率取决于网压瞬时值和感量大小。当功率开关 $S_1 \sim S_3$ 断开时,若感量相等则每个电感电流瞬时值相等,电感串联放电,所有升压电感电流下降斜率为

$$\frac{di_{Lk}}{dt} = \frac{|u_i| - u_o}{L_1 + L_2 + L_3} < 0 \quad k = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中: u_o 为输出电压。

升压电感可以工作在CCM或CRM下,在相同驱动脉冲作用下,起始放电电流相等,放电用时相同,则各电感电流谷值相同。在这种情况下,当级联数为 N 时,电压变比为

$$\frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{Nd}{1-d} \quad (3)$$

式中: d 为开关器件控制脉冲占空比。

由此可见,随着级联数 N 与占比增加,升压能力增强,如图3所示。图4中给出了感量相等时CCM下,采用相同的驱动脉冲,该AC-DC变换器

的有关波形。

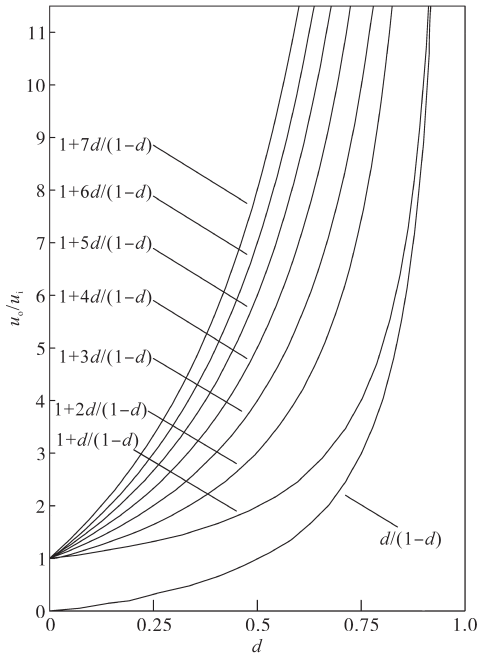


图3 感量相等时CCM模式下变换器电压变比波形
Fig.3 Voltage transfer-ratio waveforms of the AC-DC converter with equal inductances in CCM

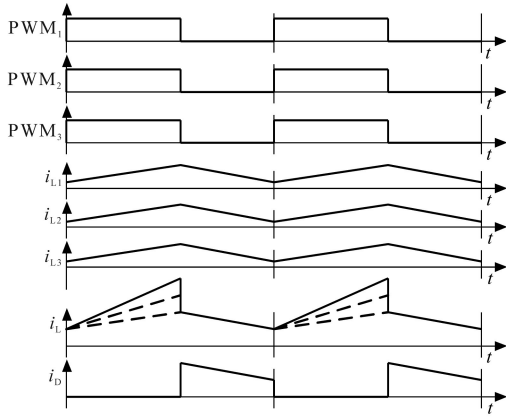


图4 感量相等时CCM下有关波形
Fig.4 Waveforms of the proposed AC-DC converter with equal inductances in CCM

1.2.2 感量不等

电感感量不等且功率开关 $S_1 \sim S_3$ 同时断开时,由于升压电感电流上升斜率不等而充电时间相同,故而功率开关断开瞬间,三个升压电感电流不等。不失一般性,设 $L_1 > L_2 > L_3$,则功率开关关断瞬间, i_{L1} 最小、 i_{L3} 最大。忽略功率二极管及功率开关压降,功率开关 $S_1 \sim S_3$ 断开后的续流阶段包括三个阶段:

阶段1: L_1 与 L_2 电流基本不变, L_3 电流下降,电流下降斜率为 $(|u_i| - u_o)/L_3$,输出电流 i_o 等于 L_3 电流,斜率较大。后级电解电容充电电压为 $|u_i| +$

$L_3 di_{L3}/dt$;

阶段2: L_1 电流基本不变, L_2, L_3 串联续流,电流下降斜率为 $(|u_i| - u_o)/(L_2 + L_3)$ 。后级电解电容充电电压为 $|u_i| + (L_2 di_{L2} + L_3 di_{L3})/dt$;

阶段3: L_1, L_2 与 L_3 串联续流,电流下降斜率为 $(|u_i| - u_o)/(L_1 + L_2 + L_3)$ 。后级电解电容充电电压为 $|u_i| + (L_1 di_{L1} + L_2 di_{L2} + L_3 di_{L3})/dt$ 。

出现上述三个阶段的原因如下:阶段1电感 L_1, L_2 分别与二极管 D_5, D_7 并联后与 L_3 串联续流。由于二极管 D_5, D_7 的导通,造成大电感端电压钳位至零,使得电感电流出现近似恒流区;当 i_{L3} 下降至与 i_{L2} 相等时,流经 D_7 电流下降至零, D_7 自然关断, L_2, L_3 串联续流,进入阶段2;同理,当 i_{L2} 下降至与 i_{L1} 相等时,流经 D_5 电流下降至零, D_5 自然关断,进入阶段3。

因此,感量不等时电感电流不会突变,不会因电感电流突变产生超高浪涌电压危害器件安全。在感量差别不大时,三个电感将尽快进入阶段3,电感电流的谷值将始终相等,谷值不为零时,即可工作在CCM下。

图5给出了感量不等时CCM下,采用相同的驱动脉冲,该AC-DC变换器的有关波形。

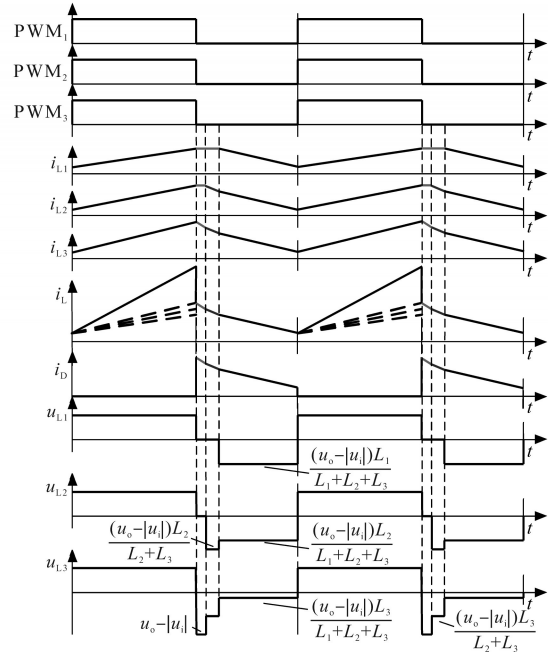


图5 感量不等时CCM下有关波形

Fig.5 Waveforms of the proposed AC-DC converter with unequal inductances in CCM

综合以上分析,相比图1,图2所示电路具有如下特点:

1) 具有可以扩充的、更高的升压能力,感量

相等或不等时都可以工作在CCM下;

2)可以采用现有的APFC模拟控制器,如L4981BD,UCC3854,IR1155S等,所有功率开关可以采用同一驱动器或独立采用驱动器;

3)功率地、控制地与检测地共地,节省检测电路成本;

4)对于 N 级升压结构,高端只需采用 N 个二合一的共阴功率二极管。

2 单周期控制器设计

图2所示的高倍升压AC-DC变换器可以采

用现有模拟控制器、数字控制器实现。数字控制器适用于升压电感工作于CCM或DCM情况,但是现有模拟控制器只适用于升压电感工作于CCM情况。

本文选取单周期控制(OCC)原理和CCM控制模式的模拟控制芯片IR1155S作为控制器,设计如图6所示的高倍升压单相AC-DC变换器。考虑到该电路控制地、功率地、检测地相同,且非隔离型驱动器延时小、驱动电流大,图中选用非隔离型驱动器FAN3100作为功率开关驱动器。

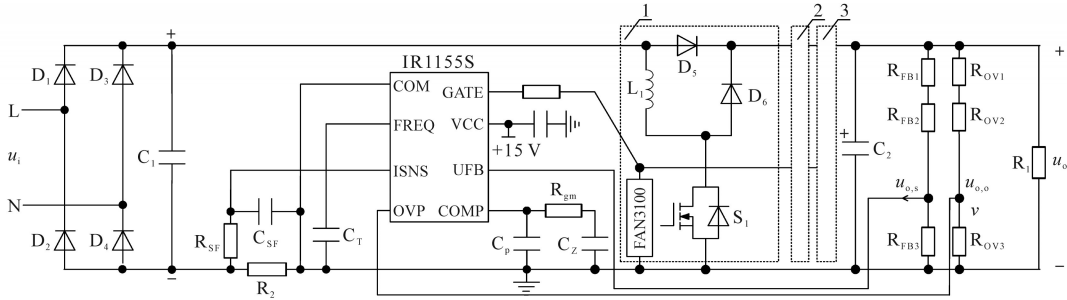


图6 基于IR1155S的开关电感级联型高倍升压AC-DC变换器

Fig.6 Switched inductor cascaded high transfer-ratio Boost AC-DC converter based on IR1155S

2.1 各部分传递函数

基于IR1155S高倍升压单相AC-DC变换器的小信号模型电路如图7所示。

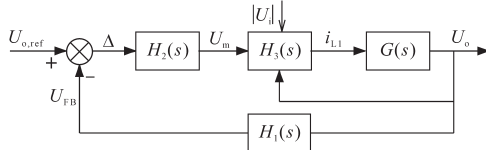


图7 IR1155S APFC小信号模型

Fig.7 Small signal model of IR1155S APFC

图7中, $H_1(s)$ 为输出分压器传递函数; $H_2(s)$ 为电压误差放大器和补偿器传递函数; $H_3(s)$ 为单周期控制调制器传递函数; $G(s)$ 为功率电路的传递函数。整个环路的开环传递函数 $T(s)$ 如下式所示:

$$T(s) = H_1(s)H_2(s)H_3(s)G(s) \quad (4)$$

纯阻性负载时,功率电路传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{U_i}{U_o} \times \frac{R_1/2}{1 + sC_2R_1/2} \quad (5)$$

式中: U_i 为输入电压有效值; U_o 为输出电压平均值; R_1 为负载电阻; C_2 为输出电容。

输出分压器传递函数 $H_1(s)$ 为

$$H_1(s) = \frac{U_{o,ref}}{U_o} \quad (6)$$

式中: $U_{o,ref}$ 为IR1155S内部参考电压。

IR1155S芯片COMP引脚外接软启动电容 C_z 、跨导电阻 R_{gm} 、极点电容 C_p 构成跨导型电压误差放大器,作为输出电压补偿网络。输出电压补偿器传递函数 $H_2(s)$ 为

$$H_2(s) = \frac{g_m \cdot (1 + sR_{gm}C_z)}{s(C_z + C_p + sR_{gm}C_zC_p)} \quad (7)$$

式中: g_m 为跨导,取值 $50 \mu S$ 。

单周期控制调制器传递函数 $H_3(s)$ 为

$$H_3(s) = \frac{U_i}{U_o R_2 G_{DC}} \quad (8)$$

式中: R_2 为采样电阻; G_{DC} 为直流增益, $G_{DC}=3.1$ 。

2.2 输出电压补偿网络设计步骤

2.2.1 选择软启动电容 C_z

基于软启动时间选择 C_z ,软启动时间选取典型值 40 ms 。软启动时间内COMP引脚电压 U_{COMP} 从0升至最大值。软启动电容为

$$C_z = \frac{t_{ss} \cdot i_{OVEA}}{U_{COMP(EFF)}} = 0.36 \mu F \quad (9)$$

式中: i_{OVEA} 为源电流, $i_{OVEA}=44 \mu A$; $U_{COMP(EFF)}$ 为有效COMP管脚电压, $U_{COMP(EFF)}=4.9 \text{ V}$; t_{ss} 为软启动时间, $t_{ss}=40 \text{ ms}$ 。

可选择 $C_z=0.33 \mu F$ 。

2.2.2 选择跨导电阻 R_{gm}

R_{gm} 的选择应该确保 $H_1(s)H_2(s)$ 的2倍网频衰

减量足够小,以此避免网侧电流畸变。设效率为92%,首先计算出2倍网频纹波电压幅值,考虑最低网频 $f_{AC}=47$ Hz,此时出现最大纹波电压,则峰-零纹波电压 U_{OPK} 为

$$U_{OPK} = \frac{P_{IN(MAX)}}{2\pi \cdot 2 \cdot f_{AC} \cdot C_2 \cdot U_o} = 5.09 \text{ V} \quad (10)$$

输出电压中峰-峰纹波电压为 $2U_{OPK}$,经过电阻分压和误差放大器补偿网络,该电压反映到 U_{COMP} ,引起 ΔU_{COMP} 。与误差放大器输出电压摆幅 $U_{COMP(EFF)}$ 相比, ΔU_{COMP} 应足够小,选择 $\Delta U_{COMP}/U_{COMP}$ 变化范围为1.0%,以获得较高相位裕量和在负载阶跃时较低振荡响应。1.0%衰减要求为

$$G_{VA} = \frac{U_{COMP(EFF)} \cdot 0.01}{2 \cdot U_{OPK}} = -46.4 \text{ dB} \quad (11)$$

式中: G_{VA} 为 $H_1(s)H_2(s)$ 在2倍网频下所需的衰减量。

而且, $H_1(s) = U_{o,ref}/U_o$,即

$$H_1(s) = \frac{5 \text{ V}}{385 \text{ V}} = 0.013 = -37.7 \text{ dB} \quad (12)$$

因此2倍网频处仅仅来自 $H_2(s)$ 的所需衰减为

$$G_{VA} - H_1(s) = -8.7 \text{ dB} = 0.371 \quad (13)$$

由于电压补偿器极点的设置应该远高于2倍网频,因此 $C_Z \gg C_p$,则在2倍网频处误差放大器传递函数可以近似为

$$H_2(s) \cong \frac{g_m \cdot (1 + sR_{gm}C_Z)}{sC_Z} \quad (14)$$

由于 C_Z 已经确定,只需计算 R_{gm} ,计算公式为

$$|H_2(j2\pi f_{AC})| = G_{VA} - H_1(j2\pi f_{AC}) = -8.7 \text{ dB} \quad (15)$$

$$R_{gm} = \sqrt{\left[\frac{G_{VA} - H_1(j2\pi f_{AC})}{g_m} \right]^2 - \left(\frac{1}{2\pi \cdot 2f_{AC}C_Z} \right)^2} = 5.36 \text{ k}\Omega \quad (16)$$

阻性负载时,功率电路传递函数中零点对应频率可以估算为

$$f_Z = \frac{1}{2\pi \cdot R_{gm} \cdot C_Z} = 89.99 \text{ Hz} \quad (17)$$

功率电路传递函数中的极点频率为

$$f_{PS} = \frac{1}{2\pi \cdot C_2 \cdot \frac{R_1}{2}} = 2.7 \text{ Hz} \quad (18)$$

2.2.3 选择极点电容 C_p

根据高频极点位置选择 C_p 。极点频率的选择应高于交越频率、远低于开关频率,本文中 $1/6 \times f_{sw}$,可得:

$$f_{p0} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{gm} \frac{C_Z C_p}{C_Z + C_p}} \cong \frac{1}{2\pi \cdot R_{gm} \cdot C_p} \quad (19)$$

$$C_p = \frac{1}{2\pi \cdot R_{gm} \cdot f_{p0}} = 3.56 \text{ nF} \quad (20)$$

2.2.4 估算相位裕量

满载1.0 kW时,交流输入电压为85 V的电压环幅频和相频响应如图8所示。此时,交越频率为5 Hz,相位裕量约为28.2°,该结果满足交越频率和相位裕量的设计要求。

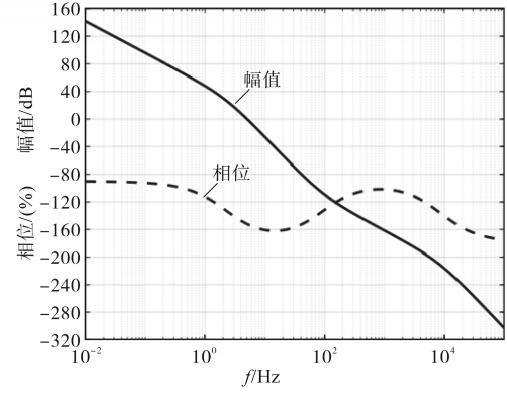


图8 AC 85 V/1.0 kW时OCC APFC开环的频率特性

Fig.8 Frequency characteristics of the open-loop of OCC APFC at AC 85 V/1.0 kW

3 仿真与实验验证

为验证理论分析正确性,对本文所提的AC-DC变换器仿真验证并搭建实验样机。仿真及实验参数如下:输入电压85 V/50 Hz,开关频率50 kHz,输出电压平均值385 V,输出功率1 kW,电感 $L_1=L_2=L_3=500 \mu\text{H}$ 。

3.1 实验波形

仿真时,分压比100:1,为消除纹波电压影响和获得385 V均值,给定电压为4 V,采用双闭环控制,内环控制策略为PI调节器。图9为在感量相等时CCM下的仿真电路,图10为此条件下电感电流波形,图11为输入电压、输入电流和输出电压波形。

该实验样机采用IR1155S芯片作为核心模拟控制芯片,实验平台如图12所示。关键参数(参数名与图6对应)如下:最大输入电流12.81 A,最大负载1 kW,输出电容 $C_2=2 \times 470 \mu\text{F}/450 \text{ V}$;交流滤波电容 $C_1=0.47 \mu\text{F}$,分流电阻 $R_2=30 \text{ m}\Omega$,滤波电阻 $R_{SF}=100 \Omega$,滤波电容 $C_{SF}=1.0 \text{ nF}$;电压反馈支路 $R_{FB1}=R_{FB2}=499 \text{ k}\Omega$, $R_{FB3}=13 \text{ k}\Omega$;过压保护支路 $R_{OVP1}=R_{OVP2}=499 \text{ k}\Omega$, $R_{OVP3}=12.8 \text{ k}\Omega$;谐振电容 $C_T=1850 \text{ pF}$,软启动电容 $C_Z=0.33 \mu\text{F}$,跨导电阻 $R_{gm}=5.36 \text{ k}\Omega$,极点电容 $C_p=3.56 \text{ nF}$ 。

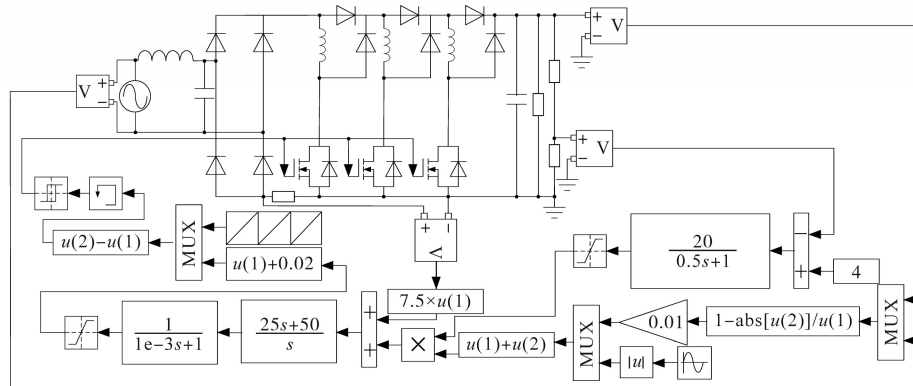


图9 感量相等时CCM下的仿真电路

Fig.9 Simulation circuit in CCM with equal inductance

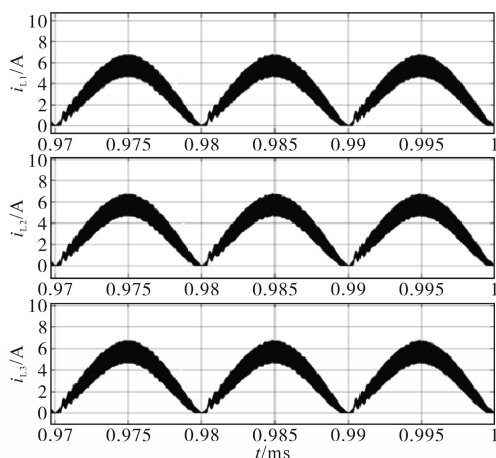


图10 仿真中感量相等时CCM下电感电流波形

Fig.10 Simulated waveforms of inductor currents in CCM with equal inductances

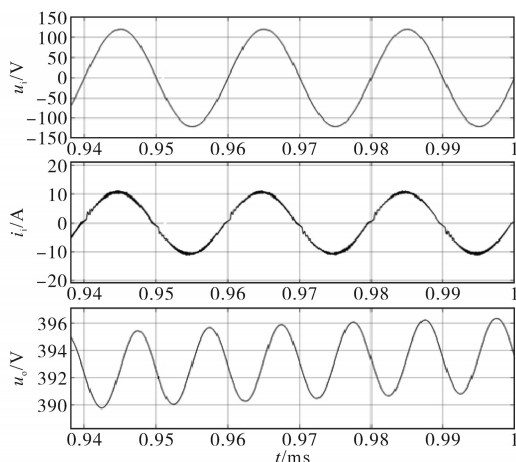


图11 仿真中感量相等时CCM下输入电压、电流、输出电压波形

Fig.11 Simulated waveforms of input voltage, current and output voltage in CCM with equal inductances

输入电压为85 V/50 Hz,输出电压为385 V,负载为600 W时,测得网侧功率因数为1。该AC-DC变换器的关键波形如图13~图15所示。其中,图13为该AC-DC变换器输入电压曲线、输出电压纹波曲线和输入电流曲线,图14为该AC-DC变换

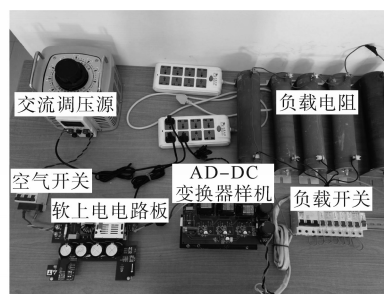


图12 开关电感级联AC-DC变换器实验平台

Fig.12 Experimental platform of switched inductor cascaded AC-DC converter

器的三个开关脉冲曲线1~3与输入电流曲线波形,图15为该AC-DC变换器的电感电流波形。

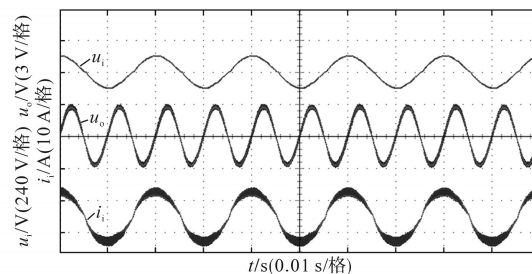


图13 输入电压、输出电压纹波、输入电流

Fig.13 Waveforms of input voltage, output voltage ripple and input current

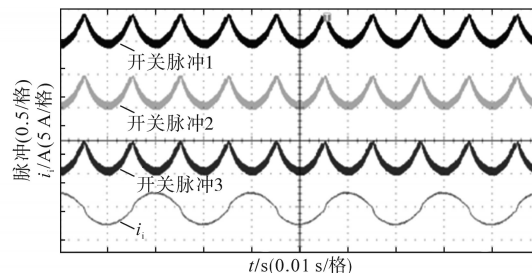


图14 开关脉冲及输入电流波形

Fig.14 Waveforms of switching pulse and input current

3.2 实验结果分析

从图10、图11、图13和图15可以看出,该AC-DC变换器双闭环控制与单周期控制皆可采

用,控制简单,且交流侧功率因数高,实验测得网侧功率因数为1,说明该AC-DC变换器具有良好的功率因数校正能力。再者电感值在实际运行时总会受到流经电流大小以及磁芯饱和程度的影响,故而感量完全相同不会实现,但在实验中,该变换器运行安全稳定,说明该变换器能在感量不等时运行,验证了感量不等CCM下理论分析的正确性,也表明该AC-DC变换器具有运行安全性。从图14可以看出,采用IR1155S单周期控制,三个开关脉冲同步性良好,证明多级级联时该变换器可使用同一驱动器,节省成本。

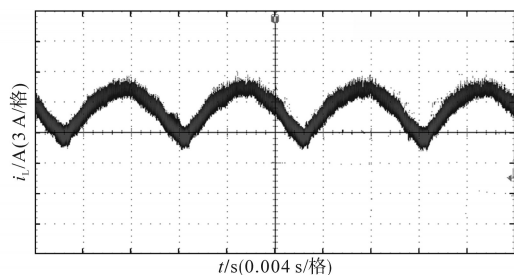


图15 电感电流波形

Fig.15 Waveform of inductor current

4 结论

采用并联充电、串联放电原理,提出了一种开关电感级联型高倍升压能力的AC-DC变换器拓扑,给出了感量相等和不等时CCM下的关键波形,基于模拟控制器IR1155S设计了感量相等时、单周期控制、CCM下的实现方案,并对该AC-DC变换器进行仿真与实验验证。研究结论如下:该AC-DC变换器具有高倍升压能力、功率因数校正能力以及运行安全稳定等优点,解决了现有开关电感型AC-DC变换器无法级联拓展以获得更高升压比以及感量不等时造成的超高浪涌电压问题。同时,感量不等时大电感出现的恒定电流平台值得进一步思考其应用场合。

参考文献

[1] Huber L, Jang Y, Jovanović M M. Performance evaluation of bridgeless PFC Boost rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power

Electronics, 2008, 23(3): 1381-1390.

- [2] Dias J C, Lazzarin T B. A family of voltage-multiplier unidirectional single-phase hybrid Boost PFC rectifiers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 232-241.
- [3] Al-kaabi A K, Fardoun A A, Ismail E H. Bridgeless high voltage battery charger PFC rectifier[J]. Renewable Energy, 2013, 56: 24-31.
- [4] Yang L, Liang T, Chen J. Transformerless DC-DC converters with high step-up voltage gain[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3144-3152.
- [5] Lin X, Wang F. High step-up voltage gain AC-DC rectifier based on transformerless switched-inductor converter for power factor correction[C]//13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Wuhan, 2018.
- [6] Axelrod B, Berkovich Y, Ioinovici A. Transformerless DC-DC converters with a very high DC line-to-load voltage ratio[C]//Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, Bangkok, Thailand, 2003.
- [7] Axelrod B, Berkovich Y, Ioinovici A. Hybrid switched-capacitor-Cuk/Zeta/Sepic converters in step-up mode[C]//IEEE International Symposium on Circuits and System, Kobe, Japan, 2005.
- [8] Cortez D F, Barbi I. A family of high-voltage gain single-phase hybrid switched-capacitor PFC rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(8): 4189-4198.
- [9] Costa P J S, IIIa Font C H, Lazzarin T B. Single-phase hybrid switched-capacitor voltage-doubler SEPIC PFC rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5118-5130.
- [10] Bellar M D, Watanabe E H, Mesquita A C. Analysis of the dynamic and steady-state performance of Cockcroft-Walton cascade rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 526-534.
- [11] Middlebrook R D. Transformerless DC-to-DC converters with large conversion ratios[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(4): 484-488.
- [12] Smedley K. One-cycle controlled switching circuit: US, Patent 5,278,490[P]. 1994-1-11.
- [13] Helen Ding, Ramanan Natarajan. Power factor correction using IR1155 CCM PFC IC[EB/OL]. 2011[2011-02-03]. <https://www.infineon.com/dgdl/an-1166.pdf?fileId=5546d462533600a40153559aabd1128>.

收稿日期:2020-09-28

修改稿日期:2020-10-23

计及不确定性的风-柴-储组合微电网规划

张涛允¹, 张玉刚², 白文远², 张广东¹, 黄志勇³, 李岳⁴

(1. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730070; 2. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730070; 3. 北京国网富达科技发展有限公司, 北京 100160; 4. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 近来风电等可再生能源的应用越来越广泛, 储能系统能够降低风电间歇性带来的不利影响, 风-柴-储组合微电网发展迅速。建立了一种计及不确定性的风电、柴油发电以及储能系统的组合电力系统容量扩展规划模型。为了计及风电及负荷的不确定性, 基于蒙特卡洛法模拟生成了大量场景, 其中风速、负荷预测误差以及柴油机和风力发电机的可用性是最重要的随机变量。模型中考虑了投资费用、运行成本以及停电损失费用, 提出了一种新方法模拟能源服务系统的运行约束, 并建立了储能系统生命周期模型以完成对不同储能系统技术的评估。利用混合整数规划方法对典型风电-柴油机-储能系统进行规划, 并将获得的结果与传统的储能系统初始规模进行比较, 结果表明了所提模型和方法的经济性和有效性。

关键词: 风电; 储能系统生命周期; 电网扩展规划; 不确定性分析

中图分类号: TM7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22523

Wind-Diesel-Storage Combination Microgrid Planning Considering Uncertainty

ZHANG Taoyun¹, ZHANG Yugang², BAI Wenyuan², ZHANG Guangdong¹, HUANG Zhiyong³, LI Yue⁴

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Gansu Electric Power Company of State Grid, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Beijing State Grid Fuda Technology Development Co., Ltd., Beijing 100160, China; 4. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: Recently, the wind power and other renewable energy sources have been more and more widely applied. The energy storage system can reduce the adverse effects brought by wind power intermittently, wind power-diesel engine-energy storage combined micro-grid develops rapidly. A combined power system capacity expansion planning model for wind power, diesel power generation and energy storage system was proposed. In order to account for the uncertainty of wind power and load, a large number of scenarios were generated based on Monte Carlo simulation, in which the wind speed, load forecasting error and the availability of diesel engines and wind turbines are the most important random variables. Considering the investment cost, operation cost and power failure loss cost, a new method was proposed to simulate the operation constraint of energy service system, and the energy storage system life cycle model was established to complete the evaluation of different energy storage system technologies. The hybrid integer programming method was used to plan the typical wind-diesel-energy storage system, and the results were compared with the initial scale of the traditional energy storage system. The results show the economy and effectiveness of the proposed model and method.

Key words: wind power; energy storage system life cycle; grid expansion planning; uncertainty analysis

传统微电网通常由柴油发电机供电, 然而柴油的高昂成本以及相对昂贵的、或不可能通过不同电网铺设输电线路的方式, 促使偏远地区微电网供电要利用可再生能源。现已有大量关于微电网的运行和规划的研究^[1-3]。在这方面, 风能柴

油系统代表着未来的研究方向。风电的一个主要问题是风的间歇性, 由于风力涡轮机的有功功率波动, 很难匹配负载生成平衡^[4-5]。风、光等分布式电源出力与负荷功率的不确定性对微电网规划影响显著, 文献^[6-7]采用了鲁棒优化的方法

来处理不确定性,但仅统计出风电、光伏发电以及负荷的大致波动范围。在孤岛运行的微电网中,风能的高渗透率可能会大大降低系统的运行可靠性,还必须考虑更多细节。此外,柴油发电机通常会保留在孤岛运行的微电网中,以控制系统的电压和频率^[8]。目前,结合可靠性标准或经济考虑因素的独立电力系统的规划已在单独的工作中进行了研究。

储能系统(energy storage system, ESS)可以通过在低负载时存储能量并在高负载时释放存储的能量来减轻风力发电的不确定性,因此ESS是未来微电网不可或缺的组成部分^[9-11]。但是选择ESS时应同时考虑可靠性指标和节省总成本,文献[12-13]的方法多集中在ESS最佳固定大小选择上,但随着大规模ESS技术的发展,可以在几乎不受位置和大小限制的情况下安装储能设施。此外,储能系统的电池容量衰减现象在规划中长期被忽视,但ESS的容量大小在整个时间跨度内被扩大可有效提高系统经济性。

综上所述,虽然关于含风电和储能系统的电力系统规划做了大量研究,但是关于风电-柴油机-储能系统的组合电力系统规划相关研究较少,且电网逐渐趋于饱和,电力系统的容量扩展规划在生产实际中更具有现实意义。因此,提出了一个含风-柴-储组合系统的微电网扩展规划模型,并采用了一种随机优化方法,以解决与风力发电和负荷相关的不确定性问题。在提出的方法中,使用蒙特卡洛模拟生成大量场景。优化模型所需的计算工作量是关于场景数的函数,提出一种场景削减方法,使原系统在较少的场景数下获得可接受的近似值,大幅减少了计算量。为了使孤岛运行的微电网的总成本降至最低,考虑了投资、运营、维护和停电成本。此外,除了柴油机和ESS的实际限制外,在此优化过程中还必须满足可靠性限制。

1 蒙特卡洛随机规划

随机规划是一种数学优化问题,问题中的部分或所有参数由随机变量表示。当统计数据不足以支持随机优化时,场景分析是解决多周期优化问题的常用方法之一,每个场景都对应一个随机变量的结果^[14-16]。在电力系统的运行和规划中几种优化方法已将情景分析用于不确定性分析,其中蒙特卡洛方法的主要思想是估计由场景定

义的目标函数的期望值。蒙特卡洛方法的显著优势之一是达到指定精度水平所需的样本数量与系统大小无关,因此蒙特卡洛非常适合分析大型系统。

1.1 场景生成

场景是基于蒙特卡洛模拟生成的,风速、负荷预测误差以及柴油和风力发电机组的可用性是每种情况下必须指定的最重要的随机变量。历史时间序列的采样和使用统计模型是场景生成最常用的方法。

1.1.1 风力发电

为了模拟风速的随机性,使用了威布尔分布概率函数:

$$f(v) = \left(\frac{I}{C}\right) \left(\frac{v}{C}\right)^{I-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{C}\right)^I\right] \quad (1)$$

式中: v, I, C 分别为风速、形状因子和比例因子。

风力发电机的风速的功率输出函数 $P_W^{\max}$ 可表示为

$$P_W^{\max} = \begin{cases} 0 & v \leq v_c \\ R_{Cw} \frac{(v - v_c)}{(v_R - v_c)} & v_c \leq v \leq v_R \\ R_{Cw} & v_R \leq v \leq v_F \\ 0 & v \geq v_F \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_{Cw} 为额定电量; v_c 为切入风速; v_R 为额定风速; v_F 为切出风速。

1.1.2 风力和柴油发电的可用性

在场景生成中,必须为每个柴油机组和风力涡轮机计算在规划期间内的机组可用性,发电机组可用性状态的时间序列是基于其故障率和维修时间使用指数分布生成的。蒙特卡洛方法用于在计划时间范围内使用两阶段连续时间马尔可夫链模型来表示元件故障。

1.1.3 负荷预测不确定性

负荷预测需要足够的历史数据来确定代表误差的准确分布函数,可使用正态分布来模拟负荷预测的不确定性^[17]。正态分布的均值描述了高峰负荷预测,正态分布可以划分为若干离散区间,每个区间对应的荷载概率等于区间的中点。为了模拟负荷预测误差,算例研究部分采用了7个区间的正态分布。

1.2 场景削减

减少场景的主要方法是根据随机分布之间的距离来控制适应度函数(作为概率指标),使用算法的详细信息如文献[18]所述。使用蒙特卡洛

模拟生成方案,场景削减后将保留 S 个方案。场景削减过程一直持续到使用其余方案计算出的 σ_{LOLE} 将小于预定值。预定值通常为0.01~0.05,可表示为

$$\sigma_{LOLE} = \frac{1}{S} \sqrt{\sum_{x=1}^S \frac{(LOLE^x - \overline{LOLE})^2}{S-1}} \quad (3)$$

$$\sigma_{LOLE} \leq \sigma_{fix} \quad (4)$$

式中: $LOLE^x$ 为与场景 x 相关的失负荷时间期望,基于风电和柴油发电机组故障停电率计算; $\overline{LOLE}$ 为 S 个场景的失负荷时间期望平均值; σ_{fix} 为失负荷时间期的期望标准偏差。

2 规划模型

2.1 目标函数

考虑从场景削减算法中获得的每个场景的概率,以系统总成本最小为目标函数。系统总成本包括投资成本、运营成本、维护成本和停电损失费用,如下式所示:

$$\min \sum_{x=1}^S P^x \left[\sum_{y=1}^T (I_y + O_y^x + M_y^x + IC_y^x) (1+DR)^{-y} \right] \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} I_y &= (P_y^{ESS} - P_{y-1}^{ESS}) IC_{ESS} + \sum_{i=1}^{D_{ymax}} (XD_y^i - XD_{y-1}^i) IC_D + \\ &\quad \sum_{i=1}^{W_{ymax}} (XW_y^i - XW_{y-1}^i) IC_W \\ O_y^x &= (P_y^{ESS} - P_{y-1}^{ESS}) \times OMC_{ESS} + \frac{365}{ND} \sum_{day=1}^{ND} \sum_{h=1}^{24} \times \\ &\quad \left[\sum_{i=1}^{D_{ymax}} P_{di}^x(t) \times HR \times FP + \sum_{i=1}^{W_{ymax}} P_{wi}^x(t) \times OC_W \right] \\ IC_y^x &= \frac{365}{ND} \sum_{day=1}^{ND} \sum_{h=1}^{24} LS^x(t) \times VOLL \end{aligned}$$

式中: P^x 为场景 x 的概率; T 为规划总年限; I_y 为第 y 年投资成本; O_y^x 为第 y 年第 x 个场景的运行费用; M_y^x 为第 y 年第 x 个场景的维护费用; IC_y^x 为第 y 年第 x 个场景的停电损失费用; DR 为折旧率; P_y^{ESS} 为第 y 年ESS的容量; IC_{ESS} 为ESS单位投资费用; D_{ymax} 为柴油机组的最大数量; XD_y^i 为二进制值表示第 y 年 i 号柴油机组的购买状态; IC_D 为柴油机组单位投资费用; W_{ymax} 为风电机组的最大数量; XW_y^i 为二进制值表示第 y 年 i 号风电机组的购买状态; IC_W 为风电机组单位投资费用; OMC_{ESS} 为ESS的运行维护费用; ND 为一年之中考虑的天数; $P_{di}^x(t)$ 为场景 x 在 t 时刻的第 i 台柴油机功率; HR 为消热

率; FP 为燃料费用; $P_{wi}^x(t)$ 为场景 x 在 t 时刻的第 i 台风机功率; OC_W 为风电机组的运行费用; IC_y^x 为场景 x 下第 y 年的停电损失费用; $VOLL$ 为失负荷价值; $LS^x(t)$ 为场景 x 下第 t 时刻的甩负荷量。

目标函数计算了现值中的所有成本,将 $(1+DR)^{-y}$ 与目标函数相乘可得到由于市场利率而产生的机会成本。

2.2 投资约束

由于经济和技术原因,投资约束如下所示:

$$0 \leq \sum_{i=1}^{D_{ymax}} (XD_y^i - XD_{y-1}^i) \leq D_{ymax} \quad (6)$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^{W_{ymax}} (XW_y^i - XW_{y-1}^i) \leq W_{ymax} \quad (7)$$

$$0 \leq I_y \leq I_{ymax} \quad (8)$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^{W_{ymax}} XW_y^i \leq W_{ymax} \quad (9)$$

$$XW_{y-1}^i \leq XW_y^i \quad (10)$$

$$XD_{y-1}^i \leq XD_y^i \quad (11)$$

$$P_{y-1}^{ESS} \leq P_y^{ESS} \quad (12)$$

式中: D_{ymax} 为第 y 年允许的最大购置柴油机组数; W_{ymax} 为第 y 年允许的最大购置风电机组数; I_{ymax} 为第 y 年的最大投资; W_{ymax} 为允许的最大购置风电机组数。

2.3 运行约束

负荷或风力发电的干扰会导致瞬时功率平衡失配,因此需要对系统稳定性和扰动下的动态行为进行补充研究。

1) 负荷平衡。第 t 时刻的总发电量和消耗量相等,即

$$\sum_{i=1}^{D_{ymax}} P_{di}^x(t) + \sum_{i=1}^{W_{ymax}} P_{wi}^x(t) + LS^x(t) + P_{dch}^x(t) = P_{ch}^x(t) + L^x(t) + P_{dump}^x(t) \quad (13)$$

式中: $P_{dch}^x(t)$ 为场景 x 在 t 时刻ESS放电功率; $P_{ch}^x(t)$ 为场景 x 在 t 时刻ESS充电功率; $L^x(t)$ 为场景 x 在 t 时刻的削负荷指数; $P_{dump}^x(t)$ 为场景 x 在 t 时刻的备用负荷。

2) 风电机组出力约束为

$$0 \leq P_{wi}^x(t) \leq XW_y^i \times P_W^{max,x}(t) \times A_{wi}^x(t) \quad (14)$$

式中: $P_W^{max,x}(t)$ 为场景 x 在 t 时刻风电最大功率; $A_{wi}^x(t)$ 为场景 x 在 t 时刻第 i 台风电机组的可用状态。

$P_W^{max,x}(t)$ 和 $A_{wi}^x(t)$ 在场景削减后确定。

3) 柴油机组出力约束如下式所示:

$$XD_y^i \times P_D^{\min} \times A_{Di}^x(t) \leq P_{di}^x(t) \leq XD_y^i \times P_D^{\max} \times A_{Di}^x(t) \quad i = 1, 2, \dots, D^{\max} \quad (15)$$

式中: $P_D^{\min}$, $P_D^{\max}$ 分别为柴油机组最低功率和最大功率; $A_{Di}^x(t)$ 为场景 x 在 t 时刻第 i 台柴油机组的可用状态。

最小负荷、低负荷柴油技术和柴油机组是最常见的柴油机组运行策略。在模型中考虑到目标函数中的停电成本,隐含了旋转备用费用,因此对于每个柴油机组的旋转备用没有明确的限制。

2.4 ESS 约束

2.4.1 功率约束和电量约束

功率约束和电量约束如下式所示:

$$0 \leq P_{ch}^x(t), P_{dch}^x(t) \leq P_{ess}^y \quad (16)$$

$$(1 - DoD_{\max}) \times E_{ess}^y \leq e_{ess}^x(t) \leq (1 - DoD_{\min}) \times E_{ess}^y \quad (17)$$

式中: P_{ess}^y 为第 y 年 ESS 功率; $DoD_{\max}$, $DoD_{\min}$ 分别为最大和最小允许排放度; E_{ess}^y 为第 y 年 ESS 电量; $e_{ess}^x(t)$ 为第 t 时刻 ESS 的存储电量。

$e_{ess}^x(t)$ 可通过 ESS 效率进行简化计算,即

$$e_{ess}^x(t) = \sum_{j=1}^t \eta P_{ch}^x(j) - \frac{1}{\eta} P_{dch}^x(j) \quad (18)$$

式中: η 为 ESS 效率。

2.4.2 电量日平衡约束

由于此规划模型中选择代表一年中4个季节的4天,各天之间没有连续性,一天的第一个小时和最后一小时在 ESS 中存储的电量必须相等,即

$$\sum_{t=1}^h e_{ess}^x(t) = \sum_{t=h+1}^{24} e_{ess}^x(t) \quad (19)$$

2.4.3 生命周期约束

随着时间的流逝,电池性能会下降,电池的储能能力会下降,这种现象称为电池容量衰减。电池生命周期的标准度量是电池容量减小到其标称容量的80%的时间^[19-20]。因此,基于电池容量衰减的实际情况,相比于现有模型,本文新增考虑储能系统的生命周期约束。

电池容量吞吐量模型用于实现 ESS 生命周期估计。电池容量吞吐量表示在电池寿命耗尽之前可以通过的总 A 小时数或 W 小时数。为了确定电力系统中电池的预期寿命,传入或传出电池的 W 小时数是总和,当该值达到总吞吐量时,则认为电池寿命已用尽,如下式所示:

$$\frac{365}{ND} \sum_{y=1}^Y \sum_{d=1}^D \sum_{h=1}^{24} [P_{ch}^x(t) + P_{dch}^x(t)] \leq Thput_{PU} \times E_{ess}^y \quad (20)$$

此外,未考虑电池容量在其寿命终止之前因容量衰减而下降的影响(容量下降至其标称值的80%)。

3 算例分析

3.1 系统概述

算例考虑了孤岛运行的风电-柴油-储能系统,采用所提规划方法,使用遗传算法进行求解。该系统的基本负荷为120 kW,年增长率为8.0%。根据天气情况,一年中春夏秋冬的高峰负荷比例分别为0.81,1,0.87,0.92。

规划年限为10 a,起始年有3个柴油机,功率分别为30 kW,40 kW和50 kW,每个柴油机的平均能耗为8%,没有任何风力发电机组。一年中春夏秋冬形状系数 I 分别为1.23,1.09,1.35,1.42,比例系数值 C 分别为8.10,7.48,8.53,8.99。假设风电和柴油机类型均为一种,每台风电和柴油机的维护成本等于运行成本的2%,表1给出了柴油和风电机组的经济性能参数。

表1 发电机组数据

Tab.1 Data of generator sets

机组类型	投资费用/ [元·(kW) ⁻¹]	容量/ kW	平均能耗/ %
柴油机组	810	40	5.00
风力涡轮机	1 980	60	8.00

考虑了3种类型的电池作为不同的 ESS。类型1是典型的钠硫电池,类型2代表了一种低成本的铅酸电池,类型3是典型的溴化锌。表2列出了候选电池的技术和经济特性参数取值。

表2 ESS 数据

Tab.2 Data of ESS

ESS 类型	功率相关费用/ [元·(kW) ⁻¹]	电能相关费用/ [元·(kW·h) ⁻¹]	运行维护费用/ [元·(kW·a) ⁻¹]
类型1	6 000	1 875	173
类型2	2 250	1 875	263
类型3	2 250	1 500	173
ESS 类型	AC/AC 转换效率/%	单位机组 WG 生产量/(kW·h)	
类型1	90	8 000	
类型2	80	3 000	
类型3	85	5 000	

为简单起见,假设 $DoD_{\max}=1$, $DoD_{\min}=0$ 。生成的场景的初始数量是100,每个场景发生的概率均为1%,使用 GAMS/SCENRED 快速倒推法可以将场景数减少为6,从其余场景获得的失负荷时间期望的最大允许标准偏差假定为0.01。表3列出每个最终场景的概率。

表3 削减后各场景概率

Tab.3 Probability of scenarios after reduction

场景编号	1	2	3	4	5	6
概率/%	14	19	12	15	26	14

3.2 效率分析

所有方案中折现率为12%,燃油价格为11.25元/L,热费率为24(kW·h)/L, $VOLL$ 为37.5元/(kW·h), $LOLE_{fix}$ 为失负荷时间期望固定值,h/阶段。为了说明该方法的高效性,分析了以下3类扩展规划方案,其规划期限为10a:

方案A:没有ESS;

方案B:在规划初始年以最佳容量装备ESS,ESS仅考虑类型1;

方案C:ESS分别考虑了3种类型。

假设ESS的电量功率比为1.2。由于技术限制和站点位置的地理条件,一年中要安装的风力涡轮机的数量限制为2,规划时间范围内的风力

涡轮机的总数限制为8。

规划结果如表4所示,方案A的总成本为156.38万元/a;在方案B中采用电池类型1作为ESS可将总成本较方案A降低3.62%;通过使用类似电池类型,方案C₁中的成本降低为12.89%。此外,随着风电机组的规模的增大,方案C₁的ESS容量扩展规划较方案B更优。在限制了风力发电机组的总数条件下,小型风力发电机组中不可能达到最佳的风力渗透率,系统总成本会增加。

根据表4,方案C₁,方案C₂和方案C₃的总成本降低分别为12.87%,2.45%和10.12%。尽管类型1的电池价格高昂,但由于其效率和循环寿命较高,使其利润更高。相反投资成本和循环寿命更低的类型2对能源管理效果有限,在容量扩展规划中,ESS的运行参数以及经济参数都具有更为重要的作用。因此,考虑了ESS充放电次数的建模效率和循环寿命的能力是所提方法的主要优点之一。

表4 规划年间风电及柴油机组容量扩展规划方案及费用

Tab.4 Capacity expansion plans and costs of wind power and diesel units during the planning period

	规划/a										年总费用/万元
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
方案A	风风柴	风风	风风柴								156.38
方案B	风风	风风	风风	柴			柴柴		柴		150.68
类型1 EES/kW	200										
方案C ₁	风风柴	风风	风风	风			柴柴			柴	136.58
类型1 EES/kW	20	120	70	45	15	90	90	100	85	90	
方案C ₂	风风柴	风风	风风				柴柴			柴	152.55
类型2 EES/kW	20	0	70	0	20	20	0	220	150	145	
方案C ₃	风风柴	风风	风风	风			柴柴			柴	140.55
类型3 EES/kW	20	125	75	115	150	160	160	165	135	150	

图1给出了风力发电机组的大小为40 kW的情况下,生命周期和AC/AC转换效率对ESS在规划中占比的影响。可以看出,使用周期越长,AC/AC转换效率越高,ESS带来的经济效益越好,在容量扩展规划中的占比越高。

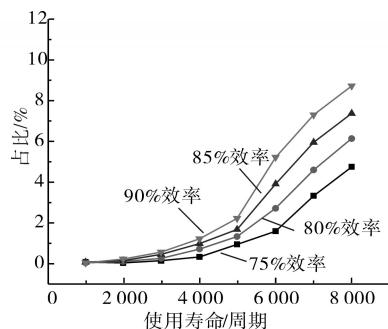


图1 生命周期和效率对ESS影响

Fig.1 Influence of service life and efficiency on ESS

3.3 灵敏度分析

ESS的电量功率比是ESS应用中的重要参数,不同的电量功率比适用于不同的ESS。图2显示了在3种不同的规划方法中,从ESS安装获得的利润的灵敏度分析。当电量功率比分别为

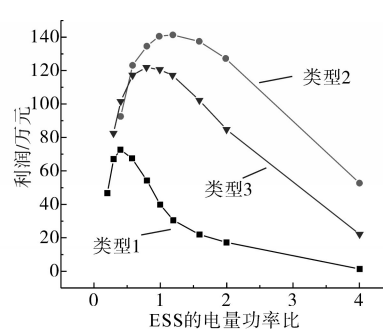
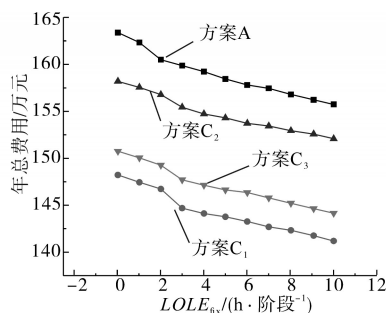


图2 ESS电量功率比影响

Fig.2 Influence of ESS power ratio

0.4, 1.2 和 0.8 时, 可获得类型 1、类型 2 和类型 3 的最大利润。风力发电机组的尺寸是总成本中的重要参数, 但柴油机组的尺寸并不是一个很重要的参数。图 3 则给出了在不同方案中 $LOLE_{fix}$ 的更改对总成本的影响, 如果将失负荷时间期望修复设置为更高值, 由于削减负荷能力的提高将使得总成本降低。

图3 $LOLE_{fix}$ 取值影响Fig.3 Influence of $LOLE_{fix}$ value

柴油机的运行成本是燃油价格的直接函数, 因燃料价格影响柴油和风电机组的能源供应贡献以及能源交易总量。燃料成本的增加导致风力单元渗透率的增加, 因此风电的随机性将导致 ESS 的能源交易量增加, 如图 4 所示。

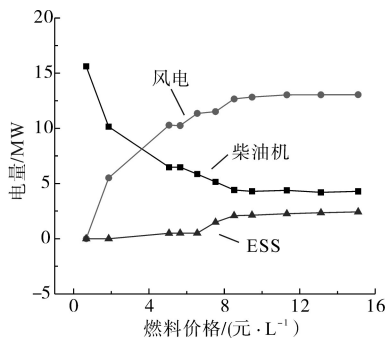


图4 燃料价格影响

Fig.4 Influence of fuel prices

4 结论

本文使用基于蒙特卡洛方法的随机规划方法来处理问题中的不确定性, 并且在风电-柴油机-储能组合电力系统的容量扩展规划中采用了一种新的方法来模拟能源服务系统的运行约束。将所得到的结果与传统 ESS 初始规模进行了比较, 结果表明在扩容过程中可节省 10% 的成本。由算例分析可知在容量扩展规划中, ESS 的运行参数与经济参数同等重要, 两类参数的显著变化均会影响 ESS 技术的选择。

总的来说, 该方法的优点是能够在较长的时间范围内扩展 ESS, 从而降低成本。应注意的是,

在实践中, ESS 扩展可能会引入一些隐藏的成本, 如与施工设备运输相关的成本、当地许可要求以及每次系统升级时所需的任何电力系统研究。

参考文献

- [1] 王守相, 张齐, 王瀚, 等. 高可再生能源渗透率下的区域多微电网系统优化规划方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 33-38, 52.
Wang Shouxiang, Zhang Qi, Wang Han, *et al.* Optimal planning method for regional multi-microgrid system with high renewable energy penetration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 33-38, 52.
- [2] 张有兵, 任帅杰, 杨晓东, 等. 考虑价格型需求响应的独立型微电网优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 55-62.
Zhang Youbing, Ren Shuaijie, Yang Xiaodong, *et al.* Optimal configuration considering price-based demand response for stand-alone microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 55-62.
- [3] 张安安, 张红, 吴建中, 等. 离岸微型综合能源系统多目标随机规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 129-142, 173.
Zhang Anan, Zhang Hong, Wu Jianzhong, *et al.* Multiobjective stochastic planning for offshore micro integrated energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 129-142, 173.
- [4] 黄永红, 罗伦, 孙小琴, 等. 风能-太阳能-蓄电池-柴油发电机独立混合发电系统的优化设计[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(2): 68-74.
Huang Yonghong, Luo Lun, Sun Xiaoqin, *et al.* Design optimization of standalone hybrid wind-PV-battery-diesel system[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(2): 68-74.
- [5] 赵晶晶, 吕雪, 符扬, 等. 基于可变系数的双馈风力机虚拟惯量与超速控制协调的风光柴微电网频率调节技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 59-68.
Zhao Jingjing, Lü Xue, Fu Yang, *et al.* Frequency regulation of the wind photovoltaic diesel microgrid based on DFIG cooperative strategy with variable coefficients between virtual inertia and over-speed control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 59-68.
- [6] 赵波, 汪湘晋, 张雪松, 等. 考虑需求侧响应及不确定性的微电网双层优化配置方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3284-3295.
Zhao Bo, Wang Xiangjin, Zhang Xuesong, *et al.* Two-layer method of microgrid optimal sizing considering demand-side response and uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3284-3295.
- [7] 吴巍, 汪可友, 李国杰. 考虑风电时空相关性的仿射可调鲁棒机组组合[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4089-4097, 4288.
Wu Wei, Wang Keyou, Li Guojie. Affinely adjustable robust unit commitment considering the spatiotemporal correlation of

- wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4089-4097, 4288.
- [8] Danny Ochoa, Sergio Martinez. Modeling an isolated hybrid wind-diesel power system for performing frequency control studies. A case of study: san cristobal island, galapagos-ecuador[J]. IEEE Latin America Transactions, 2019, 17(5): 775-787.
- [9] Wang P, Gao Z, Bertling L. Operational adequacy studies of power systems with wind farms and energy storages[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2377-2384.
- [10] 张文亮,丘明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
Zhang Wenliang, Qiu Ming, Lai Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9.
- [11] 李建林,郭斌琪,牛萌,等. 风光储系统储能容量优化配置策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1189-1196.
Li Jianlin, Guo Binqi, Niu Meng, *et al.* Optimal configuration strategy of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1189-1196.
- [12] 孙鸣,桂旭. 可向特定负荷定时限独立供电的储能系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 115-122.
Sun Ming, Gui Xu. Optimal configuration of battery energy storage system providing independent power supply for specific load during certain time[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 115-122.
- [13] 吴小刚,刘宗歧,田立亭,等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405-3411.
Wu Xiaogang, Liu Zongqi, Tian Liting, *et al.* Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3405-3411.
- [14] 刘安灵,黄振刚,王朝霞. 基于改进随机漂移粒子群算法的微电网优化运行[J]. 电子设计工程, 2018, 26(6): 33-37.
Liu Anling, Huang Zhengang, Wang Zhaoxia. Micro-grid optimization operation based on improved random drift particle swarm optimization[J]. International Electronic Elements, 2018, 26(6): 33-37.
- [15] Jikai Z, Shabbir A, Xu A S, *et al.* Multistage stochastic unit commitment using stochastic dual dynamic integer programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 1814-1823.
- [16] Jooshaki M, Farzin H, Abbaspour A, *et al.* A model for stochastic planning of distribution network and autonomous DG units[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(6): 3685-3696.
- [17] Billinton R, Allan R N. Reliability evaluation of power systems [M]. 2nd ed. New York, NY, USA: Plenum, 1996.
- [18] De Oliveira W L, Sagastizábal Claudia, Penna, *et al.* Optimal scenario tree reduction for stochastic stream flows in power generation planning problems[J]. Optimization Methods and Software, 2010, 25(6): 917-936.
- [19] Atri B, Saleh A, Yuting T, *et al.* Maximising the investment returns of a grid-connected battery considering degradation cost[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(21): 4711-4718.
- [20] Dong X, Yuying Z, Tong J. Planning-operation co-optimization model of active distribution network with energy storage considering the lifetime of batteries[J]. IEEE Access, 2018, 6: 59822-59832.

收稿日期:2020-10-10

修改稿日期:2020-10-20

基于改进灰狼算法的交直流混联电网 经济调度方法

袁泉¹,周鑫¹,周毓敏¹,吴云亮¹,张德亮²,郭少青²

(1. 南方电网公司电力调度控制中心,广东 广州 510000;

2. 北京清大科越股份有限公司,北京 100084)

摘要:为提升交直流混联电网经济调度问题求解效率,提出了一种基于改进灰狼算法的日前经济调度方法。直流输电线路与交流输电线路在网损表达式、传输特性等方面存在较大差别,造成交直流混联电网经济调度模型较传统交流电网更为复杂。由于该问题涉及大量的混合整数规划变量,传统智能算法容易陷入局部最优解,难以获得满足要求的最优解。通过引入初始对立搜索、自适应局部搜索等改进措施,提出了一种改进灰狼算法,并将其应用于含网损的交直流混联电网日前经济调度问题中。基于IEEE RTS-96三区域节点系统的算例表明,相比于粒子群算法、飞蛾扑火算法,改进算法能保证相近的求解效率基础上,避免陷入局部最优解,具有更强的搜索能力。

关键词:交直流混联电网;经济调度;改进灰狼算法;局部最优

中图分类号:TM743 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22412

A Novel Economic Dispatch Method for AC-DC Hybrid Power Grid Based on Improved Grey Wolf Algorithm

YUAN Quan¹, ZHOU Xin¹, ZHOU Yumin¹, WU Yunliang¹, ZHANG Deliang², GUO Shaoqing²

(1. China Southern Grid Power Dispatch Center, Guangzhou 510000, Guangdong, China;

2. Beijing QU Creative Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of economic dispatch in AC-DC hybrid power grid, a day-ahead dispatching method based on an improved gray wolf algorithm was proposed. There are great differences between DC and AC transmission lines in terms of network loss expression and transmission characteristics, which makes the economic dispatch model of AC-DC hybrid power grid more complex than that of traditional AC power grid. Because this problem involves a large number of mixed integer programming variables, the traditional intelligent algorithm is easy to fall into the local optimal solution and difficult to obtain the optimal solution that meets the requirements. An improved gray wolf algorithm was proposed by introducing initial opposition search and adaptive local search and it was applied to the day-ahead economic dispatch problem of AC-DC hybrid power grid with network loss. A case study based on IEEE RTS-96 three region buses system shows that compared with particle swarm optimization and moth flapping algorithm, the improved algorithm can guarantee similar solving efficiency with avoiding falling into local optimal solution, which has stronger searching ability.

Key words: AC-DC hybrid grid; economic dispatch; improved grey wolf algorithm; locally optimal

随着电力电子技术的发展,直流输电系统得到了越来越广泛的研究和应用。无论微电网还是区域互联电网,交直流混联已成为现代电力系统重要的输电形式。由此,交直流混联电网的经

济调度问题也成为当前研究的重点^[1-2]。

直流输电系统的网损特性、传输能力等均与传统交流输电系统存在显著差异。当不考虑网损等因素时,可将直流输电系统等效为两个节

基金项目:南方电网公司技改项目(000000GS6119007)

作者简介:袁泉(1987—),男,硕士,高级工程师,Email:18939241278@189.cn

通讯作者:张德亮(1983—),男,本科,高级工程师,Email:zdl20002@163.com

点,其中潮流输出端可等效为负荷节点,潮流输入端可等效为发电节点。等效处理后,就可以采用传统交流系统的经济调度优化方法对其进行求解^[3]。然而随着电力市场发展,市场成员对电网经济调度准确性的要求日益提高,考虑网损差异的电网经济调度成为当前市场运行的支撑技术。上述等效处理方法已难以满足实际运行的要求。传统交流电网处于正常运行状态下,各节点电压与其额定电压偏差较小时,各交流输电线路的网损与其传输潮流呈近似正比关系^[4]。而对于直流系统,其传输网损与其潮流则呈二次函数关系,即当潮流增加时,网损将显著提高。因此当需要精细化考虑网损影响时,交直流电网经济调度问题将转化为非线性规划问题。由于现代电力系统规模较大,如何高效求解上述大规模非线性问题成为该领域的研究重点。文献[5]提出了分段线性化的简化处理方式,通过将直流线路的网损函数在其可行区间范围内划分为多个线性分段,将上述模型转化为混合整数线性规划问题。文献[6-7]则采用局部线性化的方式,用等效线性函数替代该非线性函数,对上述非线性问题迭代处理。然而由于上述线性化处理方式实现过程较为复杂,越来越多的研究集中于智能算法领域。文献[8-10]分别介绍了基于飞蛾扑火算法、粒子群算法等的交直流混联电网智能算法。如何避免智能算法陷入局部最优,提升算法的求解效率也成为当前交直流混联电网经济调度研究的重要问题。

为此,本文提出一种基于改进灰狼算法的交直流混联电网经济调度方法。首先介绍含网损的交直流混联电网经济调度模型,接着分析灰狼算法的改进策略及应用用于交直流混联电网后的实施方法,最后基于IEEE RTS-96节点系统构造算例,验证上述改进算法的有效性。

1 考虑网损影响的交直流混联电网经济调度模型

考虑网损影响后,交直流混联电网经济调度优化目标主要包括三个部分,分别为发电成本最低、直流网络和交流网络网损最低^[11],可表示为

$$\begin{aligned} \text{Min}(Fun) = & \alpha_1 \sum_{t=1}^{NT} \sum_{g=1}^{NG} c_g(PG_{g,t}) + \alpha_2 \sum_{t=1}^{NT} \sum_{al=1}^{NAL} PL_{al,t} + \\ & \alpha_2 \sum_{t=1}^{NT} \sum_{dl=1}^{NDL} PL_{dl,t} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: Fun 为优化目标函数; Min 为该经济调度模型为最小化优化问题; α_1, α_2 分别为发电成本优化目标和网损优化目标的权重系数,由人工设定; NT 为该优化目标中时段数; NG 为发电机组台数; NAL, NDL 分别为交、直流输电线条数; $PG_{g,t}$ 为发电机组 g 在时段 t 的发电功率, $c_g(PG_{g,t})$ 为该机组在该时段的发电成本,一般为二次函数; $PL_{al,t}, PL_{dl,t}$ 分别为直流输电线路 al 、交流输电线路 dl 在时段 t 的损耗。

直流输电线路损耗和交流输电线路损耗存在较大差异。交流输电线路损耗与线路两端节点电压、相角差、线路电阻等因素有关,考虑到电网正常运行时,节点电压一般与其额定电压偏差不超过10%^[12],在近似计算时,可将节点电压幅值设定为额定电压。据此,交流线路损耗可表示为

$$\begin{aligned} PL_{al,t} = & (U_{b1(al),t}^2 + U_{b2(al),t}^2) g_{al} - \\ & 2U_{b1(al),t} U_{b2(al),t} g_{al} \cos(\theta_{b1(al),t} - \theta_{b2(al),t}) \\ \approx & (U_{b1(al),t} - U_{b2(al),t})^2 g_{al} + \\ & U_{b1(al),t} U_{b2(al),t} g_{al} (\theta_{b1(al),t} - \theta_{b2(al),t})^2 \\ \approx & U_{set}^2 g_{al} (\theta_{b1(al),t} - \theta_{b2(al),t})^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $U_{b1(al),t}, U_{b2(al),t}$ 分别为交流输电线路 al 首端节点 $b1(al)$ 、末端节点 $b2(al)$ 时段 t 的电压幅值; $\theta_{b1(al),t}, \theta_{b2(al),t}$ 分别为两端节点该时段的电压相角; g_{al} 为该交流输电线路导纳; U_{set} 为系统节点额定电压。

考虑到输电线路两端节点相角差范围,可对其进行泰勒展开。取展开式前两项后,可将该交流输电线路损耗转化为式(2)中第一个近似项形式;考虑到节点电压与额定电压的偏差较小,对其进行第二次简化,得到最终的简化表达式,可以看出在系统电压处于正常水平下,交流输电线路损耗与两端节点的相角差平方成正比。

而对于处于双极运行状态的直流输电线路,其损耗与其传输功率平方成正比,可表示为^[13]

$$PL_{dl,t} = \frac{PF_{dl-b1,t}^2 g_{dl}}{2U_{b1(al),t}^2} \approx \frac{PF_{dl-b1,t}^2 g_{dl}}{2U_{set}^2} \quad (3)$$

式中: PF_{dl-b1} 为直流输电线路 dl 首端 $dl(b1)$ 时段 t 送出潮流功率; $U_{b1(al),t}$ 为首端对应时刻电压; g_{dl} 为该直流输电线路单级导纳。

忽略其电压波动,可对其进行简化,表示为传输功率平方形式。

参考文献[4]中的做法,将直流输电线路等效为两个具有功率相关性的节点后,可将交直流混联电网经济调度中约束条件表示为

$$\sum_{g \in b} PG_{g,t} - \sum_{b1(al) \in b} PF_{al-b1,t} + \sum_{b2(al) \in b} PF_{al-b2,t} - \sum_{b1(dl) \in b} PF_{dl-b1,t} + \sum_{b2(dl) \in b} PF_{dl-b2,t} - PD_{b,t} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{PF_{al-b1,t} - PF_{al-b2,t}}{2} = \frac{\theta_{b1(al),t} - \theta_{b2(al),t}}{x_{al}} \quad (5)$$

$$PFD_{al} \leq \frac{PF_{al-b1,t} + PF_{al-b2,t}}{2} \leq PFU_{al} \quad (6)$$

$$PFD_{dl} \leq \frac{PF_{dl-b1,t} + PF_{dl-b2,t}}{2} \leq PFU_{dl} \quad (7)$$

$$PF_{al-b1,t} - PF_{al-b2,t} \geq g_{al}(\theta_{b1(al),t} - \theta_{b2(al),t})^2 \quad (8)$$

$$PF_{dl-b1,t} - PF_{dl-b2,t} \geq PL_{dl,t} \quad (9)$$

$$PGD_g \leq PG_{g,t} \leq PGU_g \quad (10)$$

$$PPGD_g \leq PG_{g,t} - PG_{g,t-1} \leq PPGU_g \quad (11)$$

式中: $PF_{al-b1,t}$, $PF_{al-b2,t}$ 分别为交流输电线 al 首端节点 $b1(al)$ 的送输出功率和末端节点 $b2(al)$ 的注入功率; $PF_{dl-b1,t}$, $PF_{dl-b2,t}$ 分别为直流输电线 dl 首端节点 $b1(dl)$ 送输出功率和末端节点 $b2(dl)$ 注入功率; $PD_{b,t}$ 为节点 b 时段 t 的负荷需求; $g \in b$ 表示发电机组 g 与节点 b 相连; $b1(al) \in b$, $b1(dl) \in b$ 分别表示节点 b 为直流输电线路 al 和交流输电线 dl 的首端节点; $b2(al) \in b$, $b2(dl) \in b$ 分别表示节点 b 为直流输电线 al 和交流输电线 dl 的末端节点; x_{al} 为交流输电线 al 的阻抗; PFU_{al} , PFD_{al} 分别为交流输电线 al 的传输功率上、下限; PFU_{dl} , PFD_{dl} 分别为直流输电线 dl 的传输功率上、下限; PGU_g , PGD_g 分别为发电机组 g 发电功率上、下限; $PPGU_g$, $PPGD_g$ 分别为发电机组 g 爬坡能力上、下限。

以式(1)作为优化目标、以式(4)~式(11)作为约束条件,即可构建以电网运行成本和网损最低为目标,满足交直流电网运行约束的经济调度模型,可发现该模型本质上为大规模非线性规划问题^[13-14]。

2 基于改进灰狼算法的求解方法

2.1 灰狼算法简介

灰狼算法是一种基于模拟灰狼种群等级制度下狩猎行为的智能算法,其基本思想是将种群划分为4组: α , β , χ 和 δ , 由前3组指导第4组搜索,以扩大搜索范围,灰狼算法包括围猎、追捕、攻击3个步骤^[15-16]。

2.1.1 围猎

围猎用于模拟灰狼根据猎物位置调整其身

身位置的过程,可表示为

$$X(t+1) = X^p(t) - AD \quad (12)$$

$$D = CX^p(t) - X(t) \quad (13)$$

其中

$$C = 2r_2 \quad (14)$$

$$A = 2ar_1 - a \quad (15)$$

$$a = 2 - 2 \times \frac{t}{\max N} \quad (16)$$

式中: $X(t+1)$, $X(t)$ 分别为第 $t+1$ 轮及第 t 轮迭代过程中灰狼位置向量; $X^p(t)$ 为第 t 轮猎物位置,用该轮种群的最优解等效替代; D 为灰狼与猎物间的距离向量; C , A 分别为灰狼位置调整的控制变量; r_1 , r_2 为取值为 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数; a 为调控收敛过程中收敛速度的系数,随着迭代发展,取值由2逐步减少至0; $\max N$ 为设定的最大迭代次数,当达到最大迭代次数时, a 取值为0。

2.1.2 追捕

追捕用于模拟围猎结束后,灰狼种群根据新的位置重新猎寻猎物位置的过程。围猎结束后,计算种群个体适应度函数。根据适应度排序,统计灰狼种群最优解、次优解和第三优解。根据种群最优解、次优解、第三优解更新 α , β , χ 三组种群的灰狼位置,并由这三个种群的位置指导 δ 组种群灰狼调整位置。该过程可表示为

$$X_\alpha = X_1 - AD_1 \quad (17)$$

$$X_\beta = X_2 - AD_2 \quad (18)$$

$$X_\chi = X_3 - AD_3 \quad (19)$$

$$X_\delta = \frac{X_\alpha + X_\beta + X_\chi}{3} \quad (20)$$

式中: X_1 , X_2 , X_3 依次为种群中最优解、次优解、第三优解的位置; D_1 , D_2 , D_3 分别为最优解、次优解、第三优解代入式(13)后所得的距离向量; X_α , X_β , X_χ 分别为 α , β , χ 三组种群的灰狼位置; X_δ 为 δ 组种群的灰狼位置,其值为 α , β , χ 三组种群的灰狼位置的平均值。

2.1.3 攻击

攻击用于模拟当猎物已停止移动,即被灰狼种群包围后,捕获猎物的过程。根据收敛条件,判定得到最优解位置固定后,即确认捕获最优解。

2.2 改进策略

为了提升灰狼算法的全局搜索能力和搜索精度,本文中采用镜像搜索策略、 δ 扰动搜索策略、自适应局部搜索策略对传统灰狼算法进行了改进。

2.2.1 镜像搜索策略

镜像搜索策略用于改善初始值设定合理性。灰狼算法的搜索能力与其初始值设定关系密切,传统算法中初始值往往采用随机数方式生成。为此,采用镜像搜索对初始值设定进行改进,其做法是对比随机选择的初始位置与其镜像位置适应度函数取值,将适应度函数取值大的位置作为算法搜索的初始位置。任一位置的镜像位置可表示为

$$\overline{X(0)} = U + L - X(0) \quad (21)$$

式中: $X(0)$, $\overline{X(0)}$ 分别为随机选择的初始值与其镜像位置; U, L 分别为搜索空间上、下边界。

2.2.2 δ 摄动搜索策略

δ 摄动搜索策略通过在 δ 组灰狼位置迭代中增加一个自适应的局部摄动变量,提升算法搜索精度,改进后的 δ 组灰狼位置可表示为

$$X'_\delta = X_\delta + r_3 r_4 \quad (22)$$

其中

$$r_4 = X_\delta - X_\delta \times \frac{t}{T_{\max}} \quad (23)$$

式中: X_δ , X'_δ 分别为摄动改进前、后的 δ 组灰狼位置; r_3 为取值在 $[-1, 1]$ 内均匀分布的随机数,主要用于控制摄动调整方向; r_4 为随迭代次数增加取值逐步减少的自适应距离系数; $T_{\max}$ 为人工设定的最大摄动距离系数,一般取值为1。

改进前位置 X_δ 由式(20)计算得到。

2.2.3 α 局部搜索策略

α 局部搜索的目的在于避免陷入局部最优解。其实施策略是给最优解增加一个邻域范围内的随机扰动,以发现潜在的更优位置。在获得最优解对应位置 X_1 后,引入一个随机扰动,可在其邻域范围内获得一个新位置,可表示为

$$X'_1 = X_1 + \varepsilon \text{Rand} \quad (24)$$

式中: X'_1 为在最优解 X_1 邻域内引入随机扰动后获得的新位置; Rand 为 d 维随机扰动,每个元素均为取值在 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数; ε 为自适应系数,初始取值为1。

随迭代过程逐步减小, ε 可表示为

$$\varepsilon = \frac{1}{T_{\max}} \quad (25)$$

2.3 求解步骤设计

利用本文所提出的改进灰狼算法解决上述交直流混联电网经济调度问题实施步骤包括:

1)根据待求解电网实际数据,列写经济调度

模型,并将其转化为拉格朗日函数形式,作为算法判断的适应度函数^[17-18];

2)设置种群规模、最大迭代次数、待求解问题维度等基本参数;

3)随机选定种群初始位置,并采用镜像搜索策略,对比该位置和其镜像位置的适应度函数,确定种群初始位置;

4)对种群个体排序,选定最优解、次优解、第三优解,对最优解采用 α 局部搜索策略进行改进,根据 α 局部搜索策略确定的最优解,原种群中次优解、第三优解确定 α, β, χ 三组种群的灰狼位置;

5)根据 α, β, χ 三组种群的灰狼位置利用式(20)计算 δ 组灰狼初始位置,并利用 δ 摄动搜索策略对其位置进行改进;

6)判断是否满足终止条件,若满足则结束,否则返回步骤4)直至收敛。

3 算例分析

3.1 基础数据

本文将以IEEE RTS-96节点三区域系统构造算例,以验证所提出方法的有效性。该算例系统共有节点96个,由3个网架结构相同的区域电网镜像对称互联构成。各区域间联络线为直流输电线,共6条,区域内联络线为交流联络线,共114条。

算例中,系统负荷如图1中堆积图所示,最高负荷为9 386 MW,最低负荷为4 970 MW。三个区域中,区域1、区域2负荷相对较低,最大负荷分别为2 786 MW, 2 344 MW,区域3负荷较高,最大负荷为4 468 MW。

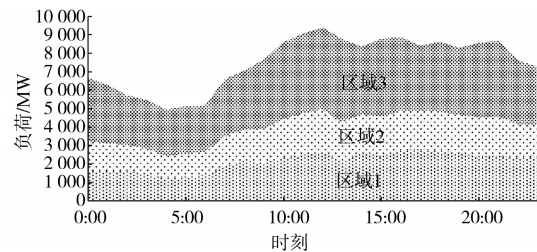


图1 系统负荷曲线

Fig.1 System load curves

电源基本信息如表1所示,全网共有发电厂30座,总装机容量达9 900 MW,三个区域装机均为3 300 MW。从发电成本来看,区域1到区域3依次增加,分别为0.34 元/(kW·h), 0.35 元/(kW·h), 0.36 元/(kW·h)。

表1 电源基本信息表

Tab.1 Basic information of power supply

区域	节点	装机/ MW	最小出力/ MW	发电成本/ [元·(kW·h) ⁻¹]
区域1	114,116,118,121	100	50	0.34
	107,113,123	300	150	
	101,102	400	200	
	115,122	600	300	
区域2	214,216,218,221	100	50	0.35
	207,213,223	300	150	
	201,202	400	200	
	215,222	600	300	
区域3	314,316,318,321	100	50	0.36
	307,313,323	300	150	
	301,302	400	200	
	315,322	600	300	

三个区域网架结构相同,每个区域中装机小的电源靠近其所在区域负荷需求节点,而装机较大的电源则靠近外送通道。从各区域负荷需求及电源分布情况可以看出,区域3供不应求且发电成本最高,将作为受端电网,接纳区域1、区域2供电;而区域1、区域2则将综合考虑发电成本、网损两方面影响优化调度安排发电。

3.2 测试结果

根据所提出改进算法的求解实施步骤,设置种群规模为50个,最大迭代次数为50次,优化目标中发电机组目标项系数 α_1 设置为1,网损目标项系数 α_2 设置为2,以适当放大网损对优化结果的影响,确保全网整体发电损耗最低。

参照2.3节所涉及的求解步骤,利用所提出的改进算法对其求解,经过24轮迭代即可收敛,每轮迭代过程中最优值变化如图2所示。可以发现,本文所提出的改进算法,具有较强的收敛性能,仅24轮即能满足收敛条件,最优解收敛过程变化率呈先快后慢的变化特性,同时随着逐步逼近最优解,每一轮求得的最优解变化率出现一定波动,表明该算法不仅具有较强的收敛速率,同时在逼近最优解过程中具有较强的搜索能力,能够有效避免陷入局部最优解问题。

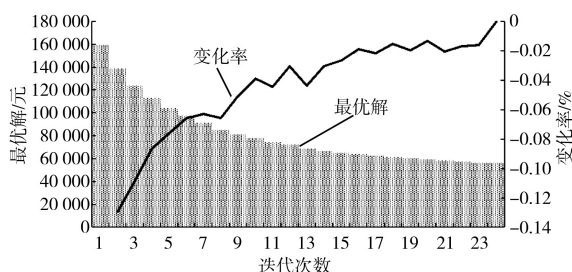
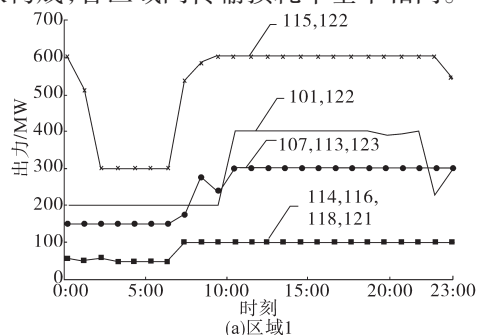


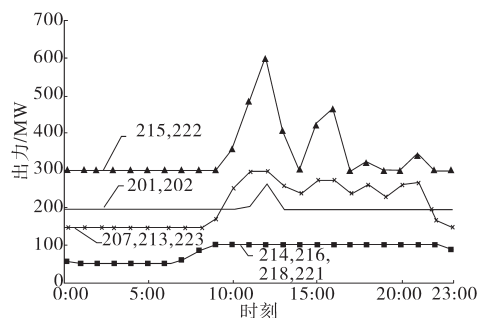
图2 迭代收敛过程

Fig.2 Iterative convergence process

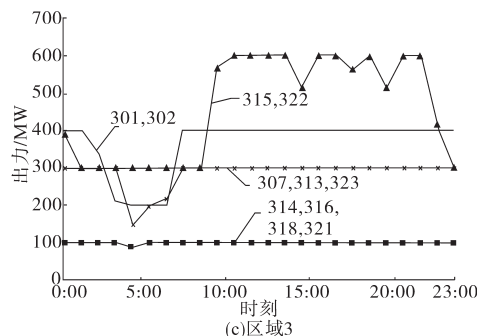
经上述求解过程所得的各发电厂出力如图3所示。对比三个区域发电厂发电计划曲线,可以发现,区域3发电厂尽管发电成本最高,但其利用小时数也最高,达到22.3 h,其原因在于尽管区域3电厂发电成本较高,但由于靠近负荷需求中心,网损较小,因此综合成本较低,利用率较高;而区域1与区域2相比,区域1发电厂利用小时数达20.1 h,较区域2高3.6 h,主要原因在于区域1电厂的发电成本较低,且以上两个区域为镜像结构互联构成,各区域间传输损耗率基本相同。



(a)区域1



(b)区域2



(c)区域3

图3 发电厂发电计划

Fig.3 Generation units' generation schedule

图4中进一步对比了区域1中各装机水平的电厂利用小时数差异,可以发现,装机为100 MW及装机为600 MW的电厂利用小时数较高,而装机为300 MW或400 MW的电厂相对较低。上述现象的原因在于装机100 MW的电厂贴近区域1负荷中心,网损较小,因此优先发电,满足本地需求;而装机600 MW的电厂考虑外送通道,区域间传输需求优先由其满足,因此也获得较高的利用

率。以上数据分析结论与算例基本情况一致,表明上述优化结果的合理性。

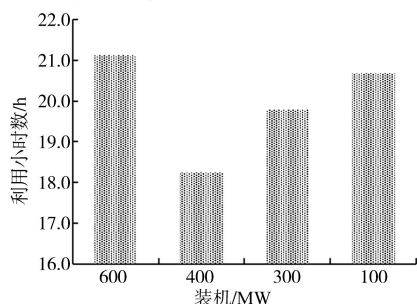


图4 区域1发电厂利用小时数

Fig.4 Utilization time of generation plant in area 1

3.3 对比分析

为进一步说明所提出算法的有效性,将对比本文所提出的改进算法、改进粒子群算法^[9]、改进飞蛾扑火算法^[8]的计算结果。如表2所示,从求解结果来看,本文所提出方法的最优解目标值为56 423元,明显低于改进粒子群算法与飞蛾扑火算法;而从计算时间来看,以上三种方法基本一致。实际上本文所提出的方法对初始值、搜索过程均进行了改进,因此对整个算法的求解效率与寻优能力均有显著提升,能够在提升求解效率的基础上,避免陷入局部最优解,对提升算法求解结果具有显著效应。

表2 优化方法对比分析

Tab.2 Comparative analysis of optimization methods

方法	最优解/元	计算时间/s
本文方法	56 423	21.4
改进粒子群算法	57 434	20.3
飞蛾扑火算法	57 654	22.5

4 结论

为实现对大规模交直流混联电网经济调度的高效求解,本文提出了一种基于改进灰狼算法的高效求解方法。该方法通过对初始值、求解过程两个方面的改进,能够在保证较高求解效率的前提下避免陷入局部最优解,提升对交直流混联电网求解能力,对提高电网调度运行水平具有显著促进作用。

参考文献

[1] 王硕,杨镜非,王冠男,等.考虑多元用户报价的交直流混合配电网动态经济调度[J].电力自动化设备,2020,40(2):82-94. Wang Shuo, Yang Jingfei, Wang Guannan, *et al.* Dynamic economic dispatch of AC/DC hybrid distribution network considering multi-user bidding[J]. Electric Power Automation Equip-

ment, 2020, 40(2): 82-94.

[2] 史光耀,邱晓燕,李星雨,等.考虑需求侧资源的含风电电力系统两阶段优化调度[J].科学技术与工程,2018,18(5):229-235. Shi Guangyao, Qiu Xiaoyan, Li Xingyu, *et al.* Two stage optimal scheduling model of wind power system considering demand side resources[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(5): 229-235.

[3] 林琳,马超,王朋.基于储能电量控制的交直流混合微网实时经济调度方法[J].智慧电力,2017,45(9):1-6. Lin Lin, Ma Chao, Wang Peng. Real time economic dispatch method of AC/DC hybrid microgrid based on energy storage control[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 1-6.

[4] Zhong H, Xia Q, Wang Y, *et al.* Dynamic economic dispatch considering transmission losses using quadratically constrained quadratic program method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2232-2241.

[5] Wu Z, Ding J, Wu Q, *et al.* Reserve constrained dynamic economic dispatch with valve-point effect: a two-stage mixed integer linear programming approach[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(2): 203-211.

[6] Tang Y, Zhong J, Liu J. A generation adjustment methodology considering fluctuations of loads and renewable energy sources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 125-132.

[7] Garcia M, Baldick R. Approximating economic dispatch by linearizing transmission losses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1009-1022.

[8] 王子琪,陈金富,张国芳,等.基于飞蛾扑火优化算法的电力系统最优潮流计算[J].电网技术,2017,41(11):3641-3647. Wang Ziqi, Chen Jinfu, Zhang Guofang, *et al.* Optimal power flow calculation with moth-flame optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3641-3647.

[9] 李亚辉,李扬,李国庆.基于协同多目标粒子群优化的交直流系统最优潮流[J].电力系统自动化,2019,43(4):94-100. Li Yahui, Li Yang, Li Guoqing. Optimal power flow for AC/DC system based on cooperative multi-objective particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 94-100.

[10] Jethmalani C, Simon S, Sundareswaran K, *et al.* Auxiliary hybrid PSO-BPNN-based transmission system loss estimation in generation scheduling[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(4): 1692-1703.

[11] 张志荣,邱晓燕,孙旭,等.协调柔性负荷与储能的交直流配电网经济优化调度[J].电力建设,2020,41(5):116-123. Zhang Zhirong, Qiu Xiaoyan, Sun Xu, *et al.* Economic optimal scheduling of AC/DC distribution network coordinating flexible load and energy storage systems[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 116-123.

[12] 于浩,秦文萍,魏斌,等.考虑预测误差的交直流混合微电网经济调度策略[J].电网技术,2019,43(11):3987-3996.

(下转第72页)

基于深度数据感知的工业园区短期负荷预测

胡博¹, 李桐², 王义贺¹, 崔嘉³, 杨俊友³, 许军金³

(1. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110015;

2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006;

3. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:结合自动编码器的特征提取能力与长短期记忆(LSTM)良好的时序预测优势,提出一种基于LSTM自编码的短期负荷预测模型。首先,基于深度模型学习能力优势,构建自动编码器的工业园区负荷数据特征提取模型。其次,给出基于格布拉斯准则的异常值判断方法和拉格朗日样条插值的缺失值补全法。最后,利用Tensorflow架构调用Keras库搭建实验平台,对轻工业负荷、重工业负荷和光伏发电工业用户负荷分别展开预测实验,实验结果验证LSTM自编码模型预测短期工业负荷的有效性。

关键词:负荷预测;工业负荷;深度学习;长短期记忆;自动编码器

中图分类号:TM712 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22913

Short-term Load Forecast of Industrial Park Based on Deep Data Aware

HU Bo¹, LI Tong², WANG Yihe¹, CUI Jia³, YANG Junyou³, XU Junjin³

(1. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110015, Liaoning, China; 2. Electric Power

Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006,

Liaoning, China; 3. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China)

Abstract: Combined with the feature extraction ability of self-coding and the time series analysis ability of long short-term memory (LSTM), a short-term load forecasting model based on LSTM self-coding was proposed. First of all, based on the basic principle and flow of the depth model, the functional characteristics of the automatic encoder were given. Secondly, the outlier judgment method based on Goblas criterion and the missing value completion method based on Lagrangian spline interpolation were proposed. Finally, using Tensorflow architecture to call Keras library to build an experimental platform to carry out forecasting experiments on light industrial load, heavy industrial load and photovoltaic industrial user load respectively, which verifies the conclusion that LSTM self-coding model is more suitable for short-term industrial load forecasting.

Key words: load forecasting; industrial load; deep learning; long short-term memory (LSTM); automatic encoder

随着智能电网的发展,电网大数据时代已经到来。据我国国家能源局在2019年发布的电力行业统计数据显示,工业用电占总用电量的70%以上。因此,分析与掌握工业区域负荷预测,是电网经济安全运行的有力保障。

国内外学者对负荷预测做了大量研究。文献[1]利用自回归积分滑动平均模型实现负荷预测。文献[2]通过傅里叶展开模型分析负荷并预

测。文献[3]通过卡尔曼滤波法建立负荷预测模型。文献[4-7]提出多种解决负荷预测问题的机器学习模型。文献[8-12]提出多种深度学习模型。虽然上述文献负荷预测的精度随着深度学习算法的发展得到进一步的提升,尤其是在有大数据作为信息支撑时,深度学习可以实现信息的充分利用,但是,深度学习保证精度的前提是数据真实完整,当数据信息坏点较多时,利用这种

基金项目:辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC1902090)

作者简介:胡博(1972—),男,博士,教授级高工,Email:hubo@ln.sgcc.com.cn

携带假信息的数据会对预测精度造成影响。而且,目前的深度学习模型没有涉及到针对工业负荷这种受多种因素干扰的预测研究,对数据的挖掘也不够彻底。

综上,目前预测研究多针对传统大规模电网负荷,鲜有专门针对工业园区负荷的预测研究。同时,工业园区负荷占比大,可调度潜力强,且运行具有一定的规律,但数据的采集和深度感知是亟需解决的难题。因此,需要一种能够对历史负荷数据和各种影响因子深度挖掘的模型,实现隐藏信息的有效利用,进而实现负荷预测精度的提高。

工业园区负荷具有强耦合性、非线性,且具有一定的冲击性,以及历史数据缺乏的明显特点。自动编码器正好对负荷数据具有非线性特征提取能力,将工业园区历史负荷数据自动编码,能够进一步突出工业园区历史负荷数据的时序性。本文利用自动编码器的特征提取性能,结合LSTM良好的时序数据处理能力,提出LSTM自编码模型,实现工业园区短期负荷预测。

1 问题描述及框架体系

工业负荷在总用电负荷中占比很大,如果能

够实现短期工业负荷的准确预测,将对电网安全稳定运行提供重要保障。但与其他类型的负荷预测不同,工业负荷预测更为复杂,难度更大,主要有两方面原因:第一,如今的负荷预测已经成为根据多变量时序数据预测的问题,短期的负荷预测更是受多种灵活变量影响,尤其对于工业负荷而言,其受天气、季节、电价等外在因素的影响更为突出;第二,工业用户的负荷数据噪声很大,使普通模型难以应对。

本文的总体研究流程与框架如图1所示。为提升工业区域短期负荷预测的精度,将主要研究以下方面:

1)对历史数据进行数据预处理,主要包括缺失值的补全、异常值的判断与替换以及输入预测模型前的数据归一化处理;

2)考虑到工业负荷的多样性,尤其是不同类型工业负荷的特点与各种外在因素密切相关,同时不同因素产生的干扰又各不相同,对工业负荷分类,选取影响工业负荷的主要外在因素;

3)智能设备为负荷预测提供充足的数据支撑,研究如何基于数据挖掘技术有效利用历史数据,充分提取数据内部深层次的特征。

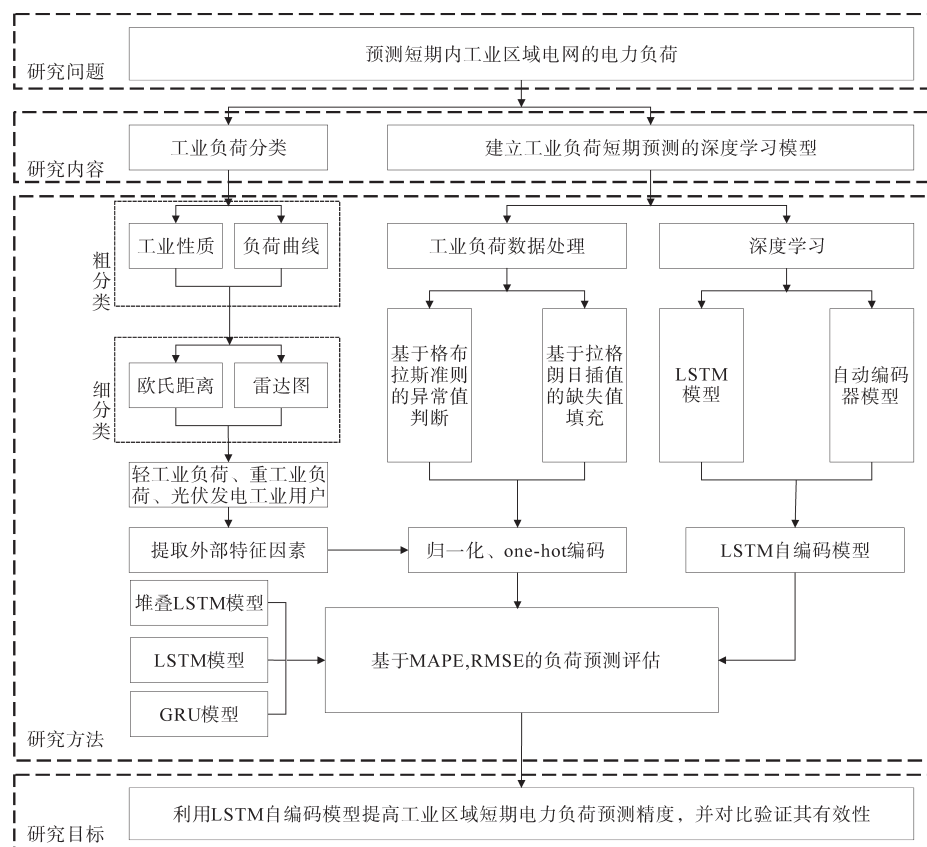


图1 总体研究框架

Fig.1 Overall research framework

2 LSTM自编码的工业园区负荷模型

2.1 LSTM工业园区负荷模型

LSTM是SimpleRNN的一种变体,在结构上改良,可以实现对长短期依赖信息的学习。因此LSTM被广泛应用于具有时序数据的预测问题,本文首次将LSTM方法引入到工业园区负荷预测。LSTM内部结构如图2所示。

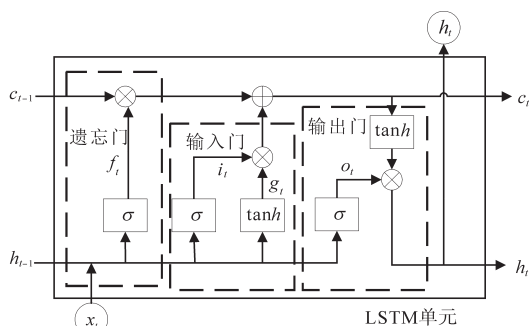


图2 LSTM结构图

Fig.2 LSTM structure diagram

2.2 自动编码器

自动编码器由输入层、隐藏层和输出层构成,其结构如图3所示。输入数据经过隐藏层后压缩,由于数据维度的降低,数据间的内部关联信息被不断提纯,再通过输出层将压缩后的数据还原为输入。整个过程的核心就是隐藏层的特征提取,基本思想就是数据表达的有效转换。

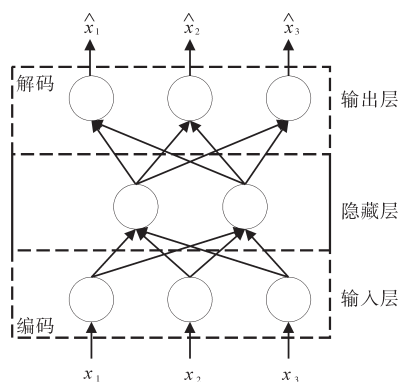


图3 自动编码器结构图

Fig.3 Automatic encoder structure diagram

2.3 LSTM自编码模型结构

本文提出的基于LSTM自编码的短期负荷预测模型结构设计如下：

1)第1层:输入LSTM层,将包含历史负荷和外部因素数据的 n 维输入矩阵 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 重构为三维矩阵[样本,步长,特征],送入第1个LSTM层,在第 t 时刻其输出为

$$H_t = LSTM(X_t) \quad (1)$$

2)第2层:RepeatVector层,RepeatVector(k)是将第1个LSTM层的输出作为本层的输入,实现 k 次重复输入量,输出3D张量形式[None, k ,Features]。

3)第3层~第5层皆为中间LSTM层,值得一提的是,这3层LSTM要设置return_sequences参数为True,使LSTM能返回序列,以便作为下一个LSTM的输入。

4)第6层为TimeDistributed层,它将Dense层独立且均匀地应用在每一个时间步上,其输入为上层LSTM返回的序列。

基于LSTM自编码的短期负荷预测模型其结构如图4所示。

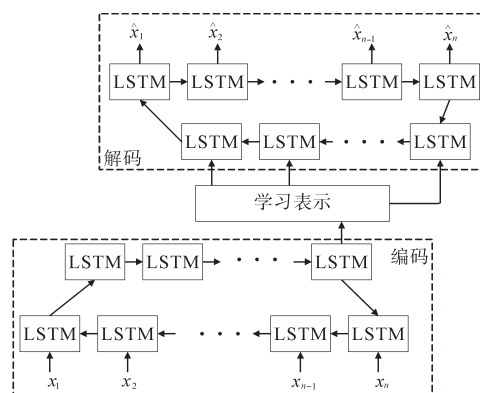


图4 LSTM自编码模块

Fig.4 LSTM self-coding module

2.4 模型预测数据处理

工业负荷的数据集噪声较大,为了最大程度保留原始数据,以下三步处理模式：

1)异常值判断:终端测量设备在收集记录信息时可能存在失准,数据集中连续变量会突现异常值,对电力负荷历史数据基于格布拉斯准则法判定异常值。

2)缺失值填充:由于设备故障或是检修,会导致时序性数据在某一时刻或一段时间内缺失记录值,对于各变量的数据序列中存在的缺失值,采用Lagrange三次样条插值补全。

3)归一化处理:不同指标的量纲不同,各类特征指标变化范围差异较大,因此要对收集的数据归一化处理。

对于时间序列数据,采用的标准化公式为

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

2.5 预测流程图

工业负荷预测难度很大,主要体现在两方面:一方面,工业区域负荷种类多样,受多种外部

因素影响,且每种不同类型负荷受不同外部因素影响的大小各不相同,尤其对于短期的负荷预测而言,外部因素的干扰权重变得更大,传统的预测方法和一般的深度学习算法难以有效准确地预测;另一方面,工业负荷数据噪声很大,对数据的有效判定清洗,可以避免模型的错误学习,提高负荷预测精度。

传统 LSTM 作为常用的预测模型,对于一般的负荷预测或是对电网整体负荷预测效果尚可,对于工业区域这种极易受外部因素影响的负荷类型,难以取得理想的预测效果,这是因为 LSTM 难以学习多种变量之间的内部联系,即使通过人工提取变量特征也会丢失一些隐藏信息。

针对上述问题,本文提出一种基于 LSTM 自编码的深度学习模型,结合自动编码器的特征提取能力与 LSTM 良好的时序预测优势,实现对多种变量数据的深度挖掘,提取其与历史负荷之间的信息,充分利用数据集可以实现工业区域电网负荷的精确短期预测。基于 LSTM 自编码的短期负荷预测流程如图 5 所示。

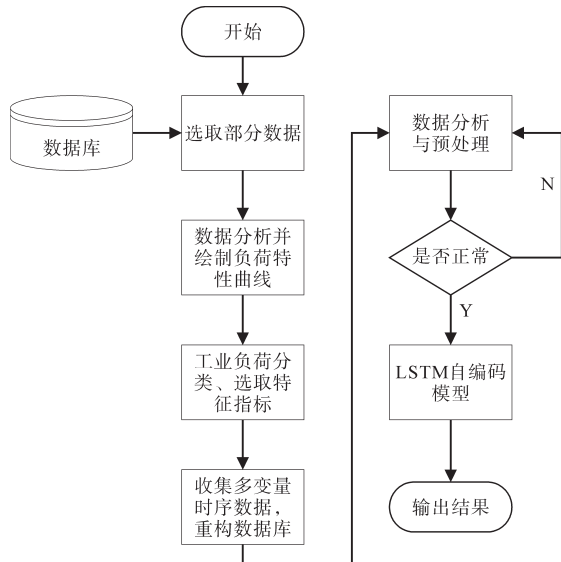


图5 基于 LSTM 自编码的短期负荷预测流程图

Fig.5 Short-term load forecasting flow chart based on LSTM self-coding

3 算例分析

3.1 实验准备

3.1.1 数据分析与预处理

基于调研的辽宁省某市内 12 家工厂的历史负荷数据,数据时间长度为从 2019 年 7 月 31 日至 2019 年 11 月 7 日,时间跨度为 100 d。选取纺织公司作为轻工业负荷代表,选取水泥公司作为重

工业负荷代表,选取商贸公司作为光伏发电工业用户代表,每个数据集中 90% 作为训练集,10% 作为测试集。

同时,收集该地区 2019 年 7 月 31 日至 11 月 7 日共计 100 d 的温度、湿度记录,将每天 24 点数据通过插值法构成 96 点数据,即每 15 min 一组,按文中提出的基于格布拉斯准则异常值判断,基于 Lagrange 完备三次样条插值缺失值填充。此外,工作日类型、峰谷分时电价对于工业用电影响很大,采用 one-hot 编码处理,若待预测日为工作日,待预测时刻为谷时电价,则补充其输入特征为[工作日,非工作日,峰时,平时,谷时],其对应编码为[1,0,0,0,1]。特征选取并收集完毕后,重构数据库,每时刻特征维度为 8 维,为后续训练模型做好准备。

3.1.2 实验设置

实验硬件设备显卡为 GTX1650,基于 python 语言编程,通过 Tensorflow 框架作背景,利用 Keras 库搭建深度学习模型,实现神经网络层的灵活叠加。

3.1.3 评价指标

为了全面准确地评估模型预测性能,参照国家电网对负荷预测的评价指标,选择以下两种指标:

1) 平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left[\frac{x(t) - y(t)}{x(t)} \right] \times 100\% \quad (3)$$

式中: n 为预测点个数; $x(t)$, $y(t)$ 分别为待预测日第 t 时刻的实际测量值与模型预测值。

2) 均方根误差(root mean square error, RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [x(t) - y(t)]^2} \quad (4)$$

3.2 实验结果分析

采用 LSTM、门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)、堆叠的 LSTM 以及提出的基于 LSTM 自编码网络 4 种模型实验,比较这 4 种模型的预测结果,给出实验结论。

搭建好网络模型后,训练过程中采用控制变量法调优,逐一调整模型参数、神经元个数、LSTM 神经网络层数,同时平衡性能与训练时间,最终确定 batch_size 为 512,训练周期设置 100,特征数为 8,步长为 192,即构建[192, 96]的滑动窗口,根据前 2 d 数据预测后一天负荷,同时设置神

经元个数为50,并在每层LSTM后设置dropout为0.2,防止过拟合。

3.2.1 轻工业负荷

对于轻工业负荷数据,表1为预测日的测试结果,记录模型对应 $MAPE$ 与 $RMSE$ 。

表1 轻工业负荷预测指标

Tab.1 Light industry load forecasting indicators

指标	LSTM 自编码	堆叠LSTM	LSTM	GRU
$MAPE/\%$	1.96	1.97	2.03	2.37
$RMSE$	25.54	25.97	26.58	30.60

从表1可以看出,提出的基于LSTM自编码的短期负荷预测模型相对于堆叠LSTM模型、LSTM模型和GRU模型预测精度有所提高,但是幅度并不大,并未突出提出模型的优势,原因可能在于轻工业负荷受外界因素干扰不大,受工作日类型影响稍明显,而对于峰谷分时电价、温度、湿度等外部因素关联较小。

轻工业用户用电负荷相对较平均,波动次数多但起伏不大,单日预测负荷曲线如图6所示。

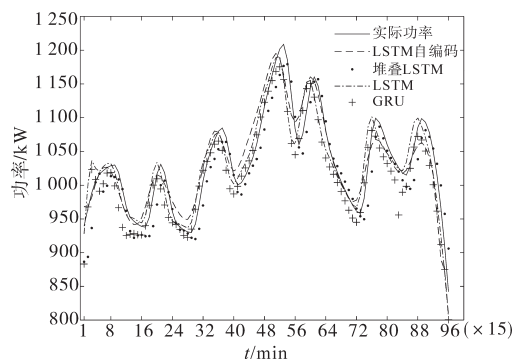


图6 轻工业负荷单日预测曲线

Fig.6 Daily forecast curves of light industrial load

由图6可以看出,提出的LSTM自编码与堆叠自编码、LSTM和GRU模型相比并不突出,在曲线上的表现性能相近,这是由于轻工业负荷受外部因素影响一般,数据内部信息通过一般神经网络挖掘即可,可以说问题的简易性限制文中提出的模型的表现。

3.2.2 重工业负荷

对于重工业负荷数据,表2记录不同模型对应的 $MAPE$ 与 $RMSE$ 。

表2 重工业负荷预测指标

Tab.2 Heavy industry load forecasting indicators

指标	LSTM 自编码	堆叠LSTM	LSTM	GRU
$MAPE/\%$	7.25	8.13	15.46	13.08
$RMSE$	194.82	267.34	434.53	493.21

由表2可知,在重工业负荷短期预测中,提出的基于LSTM自编码预测模型无论是在 $MAPE$ 指标,还是在 $RMSE$ 指标上,都要明显优于堆叠LSTM,LSTM和GRU模型。文中模型平均预测精度高达92.75%,比其余三者分别高0.88%,8.21%,5.83%。 $RMSE$ 比其余三种模型降低72.52,239.71,298.39。

重工业负荷在一天内变化次数很少,但变化幅度大,重工业类用户的用电行为受到峰谷分时电价制约,使重工业负荷在短期内会发生突变。图7为4种模型对重工业负荷单日预测的曲线,可以明显看出,基于LSTM自编码模型紧密贴合实际负荷曲线的变化,说明该模型的精度较好。这也证明LSTM自编码特征提取能力和时序预测能力的有效结合,起到实质性的作用。

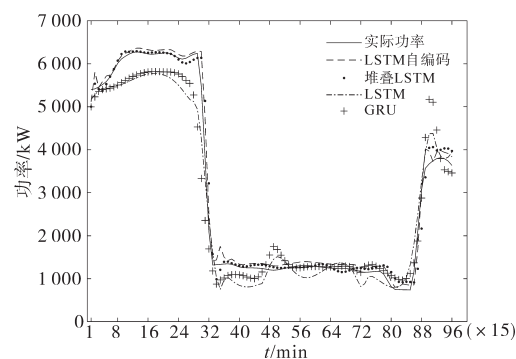


图7 重工业负荷单日预测曲线

Fig.7 Daily forecast curves of heavy industry load

3.2.3 光伏发电工业用户

光伏发电用户的单日预测指标如表3所示。

表3 光伏发电工业用户负荷预测指标

Tab.3 Load forecasting indicators of photovoltaic power generation industry users

指标	LSTM 自编码	堆叠LSTM	LSTM	GRU
$MAPE/\%$	11.21	19.91	52.79	54.98
$RMSE$	12.95	23.76	44.94	62.08

从4种模型对比可以发现,LSTM自编码模型精度达到88.79%,比堆叠LSTM模型提高8.7%,比LSTM模型提高41.58%,比GRU模型提高43.77%。 $RMSE$ 较另外三种模型分别降低10.81,31.99,49.13。

图8给出4种模型对光伏发电的工业用户单日预测的结果,LSTM和GRU都出现较大的偏差,堆叠的LSTM模型表现尚可,LSTM自编码最为接近实际负荷曲线。

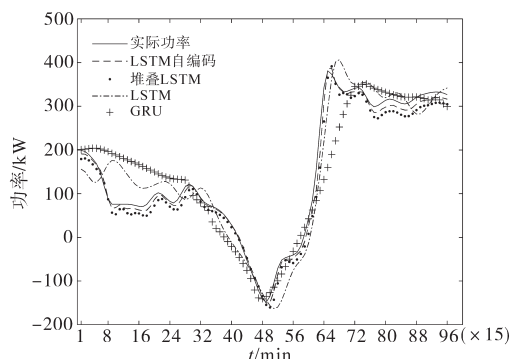


图8 光伏发电工业用户负荷单日预测曲线

Fig.8 Single-day load forecast curve for photovoltaic power industry users

4 结论

本文提出基于LSTM自编码的深度学习模型,用以实现对工业区域负荷的准确预测,经过算例分析得出以下结论:

1)基于自动编码器强大的数据挖掘能力,有效地提取隐藏层数据特征,减少工作量,明显提高传统深度学习对数据的预测精度,克服深度学习模型对数据挖掘的不彻底性。

2)LSTM自编码有效抑制各种外部因素对历史负荷数据的影响问题,深度挖掘历史负荷数据,实现隐藏信息的最大利用,工业负荷的预测精度高达92.75%,比GRU模型提高0.41%~43.77%。

3)LSTM与自动编码器的有机结合,通过相关程序达到更加智能的操作,具有更高的稳定性,使得预测结果更加精确,工业负荷预测中均方根误差比传统LSTM模型降低1.04~239.71。

4)LSTM自编码模型方法对工业负荷数据预测优势明显,比堆叠LSTM模型在工业负荷预测中平均绝对百分比误差降低0.01%~8.7%。

参考文献

- [1] 艾欣,周志宇,魏妍萍,等. 基于自回归积分滑动平均模型的可转移负荷竞价策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(20): 26-31,104.
Ai Xin, Zhou Zhiyu, Wei Yanping, *et al.* Bidding strategy for time-shiftable loads based on autoregressive integrated moving average model[J]. Power System Automation, 2017, 41(20): 26-31, 104.
- [2] 王惠中,周佳,刘轲. 电力系统短期负荷预测方法研究综述[J]. 电气自动化,2015,37(1):1-3,39.
Wang Huizhong, Zhou Jia, Liu Ke. Summary of research on the short-term load forecasting method of the electric power system [J]. Electrical Automation, 2015, 37(1): 1-3, 39.
- [3] 石文清,吴开宇,王东旭,等. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的电力系统短期负荷预测[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(9): 9-12, 23.
Shi Wenqing, Wu Kaiyu, Wang Dongxu, *et al.* Eclectic power system short-term load forecasting model based on time series analysis and Kalman filter algorithm[J]. Automation Technology and Applications, 2018, 37(9): 9-12, 23.
- [4] 李飞. 基于ESO的电压平衡器模型预测控制方法[J]. 电气传动, 2020, 50(5): 61-66, 74.
Li Fei. The predictive control method of voltage balancer model based on ESO[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 61-66, 74.
- [5] 吴玮,程国栋,王贵峰,等. LCL并网逆变器多变量模型预测控制策略[J]. 电气传动, 2020, 50(11): 7-12.
Wu Wei, Cheng Guodong, Wang Guifeng, *et al.* Multi-variable model predictive control strategy of LCL grid-connected inverter [J]. Electric Drive, 2020, 50(11): 7-12.
- [6] 陶雪峰,陈媛媛,叶磊,等. 模块化多电平变换器快速模型预测控制器设计[J]. 电气传动, 2020, 50(10): 72-78.
Tao Xuefeng, Chen Yuanyuan, Ye Lei, *et al.* Design of fast model predictive controller for modular multilevel converter[J]. Electric Drive, 2020, 50(10): 72-78.
- [7] 张兴旺,杨康佳. 基于有功电流预测算法的三相VSR软启动策略研究[J]. 电气传动, 2020, 50(8): 74-78, 92.
Zhang Xingwang, Yang Kangjia. Research on three-phase VSR soft start strategy based on active current prediction algorithm [J]. Electric Drive, 2020, 50(8): 74-78, 92.
- [8] Wen Lulu, Zhou Kaile, Yang Shanlin, *et al.* Optimal load dispatch of community microgrid with deep learning based solar power and load forecasting[J]. Energy, 2019, 171(2): 1053-1065.
- [9] 丁立,和阳,吉敬华,等. 基于新型SMO的无位置传感器PMSM模型预测控制[J]. 电气传动, 2020, 50(7): 25-30.
Ding Li, He Yang, Ji Jinghua, *et al.* Sensorless model predictive control based on new sliding mode observer for PMSM[J]. Electric Drive, 2020, 50(7): 25-30.
- [10] 陈洪波,王璨,徐斌,等. 基于LSTM网络的短期负荷预测[J]. 电工技术, 2019(9): 27-29.
Chen Hongbo, Wang Can, Xu Bin, *et al.* Short-term load forecasting based on LSTM network[J]. Electrical Technology, 2019(9): 27-29.
- [11] 陈振宇,刘金波,李晨,等. 基于LSTM与XGBoost组合模型的超短期电力负荷预测[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 614-620.
Chen Zhenyu, Liu Jinbo, Li Chen, *et al.* Ultra short-term power load forecasting based on combined LSTM-XGBoost model[J]. Power Grid Technology, 2020, 44(2): 614-620.
- [12] 陆继翔,张琪培,杨志宏,等. 基于CNN-LSTM混合神经网络模型的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 131-137.
Lu Jixiang, Zhang Qipei, Yang Zhihong, *et al.* Short term load forecasting method based on CNN-LSTM hybrid neural network model[J]. Power System Automation, 2019, 43(8): 131-137.

收稿日期:2020-09-17

修改稿日期:2020-10-27

基于改进FP-Growth和AHP算法的电压暂降影响度分析

林焱¹, 林芳¹, 黄道珊¹, 方晓玲¹, 郭凯²

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350000;

2. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了准确评估电压暂降对设备和用户造成的影响后果, 提出一种基于改进FP-Growth算法和层次分析法(AHP)的数据挖掘分析方法来评估电压暂降影响度。选取电压暂降特征属性并对其进行分类, 结合电压暂降影响度指标构建数据挖掘分析框架; 采用改进的FP-Growth算法对电压暂降事件进行关联规则挖掘, 有效提升了数据挖掘的效率; 通过层次分析法构建关联规则匹配模型, 评估电压暂降影响度, 提高了评估结果的准确性。最后, 通过实例分析验证了所提方法的实用性。

关键词: 层次分析法; 数据挖掘; 电压暂降影响度; 关联规则

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22271

Analysis of Voltage Sag Influence Based on Improved FP-Growth and AHP Algorithm

LIN Yan¹, LIN Fang¹, HUANG Daoshan¹, FANG Xiaoling¹, GUO Kai²

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350000, Fujian, China; 2. School of

Electric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the effect of voltage sag on sensitive equipment and consumers, the influence of voltage sag was evaluated by data mining method based on improved FP-Growth and analytic hierarchy process (AHP) algorithm. The characteristics of voltage sag were selected and classified, the data mining analysis framework was constructed based on the voltage sag influence index. The association rules of voltage sag events were mined by the improved FP-Growth algorithm, the efficiency of data mining was improved. The association rule matching model was constructed by AHP to evaluate the effect of voltage sag, which improve the accuracy of the evaluation results. Finally, performance and effectiveness of the proposed method were verified through the field case.

Key words: analytic hierarchy process(AHP); data mining; voltage sag influence index; association rules

随着电网中敏感设备的不断增加, 电压暂降问题越来越突出^[1]。对电压暂降对设备和用户造成的影响进行评估, 可以为电力公司和用户采取合理措施、减少敏感用户的经济损失提供理论依据^[2-3]。

现存的电压暂降严重程度评估方法主要分为两大类, 分别是随机预估法^[4-7]和实测统计法^[8-11]。其中, 随机预估法包括解析法^[4]、故障点法^[5]和蒙特卡洛法^[6-7]。解析法通过构建阻抗矩阵计算暂降电压幅值, 但是所建模型与实际情形差

异较大。故障点法通过假定系统中发生的故障位置, 分析电压暂降的严重性, 适用于各类故障运算, 但需要进行大量仿真运算, 在网络结构较大时不适用。蒙特卡洛法通过模拟预估计算网络中各节点的暂降指标, 其无法同时满足较高的精度和效率。实测统计法基于实际的测量数据, 可以准确地反映电压暂降严重程度, 可分为综合评估法^[8-9]和数据挖掘分析法^[10-11]。综合评估法将多个指标进行权重组合来评估电压暂降影响, 但是, 忽略了指标之间的同质性且指标框架难以考

基金项目: 国网福建省电力有限公司科技项目(521304190027)

作者简介: 林焱(1974—), 男, 硕士, 教授级高工, Email: lyepri@163.com

虑全面。数据挖掘分析法通过数据挖掘方法挖掘不同电压暂降特征属性与电压暂降严重程度之间的关联规则,对电压暂降严重程度进行评估。文献[10]采用数据挖掘方法进行电压暂降数据挖掘,并通过灰靶理论对电压暂降严重程度进行匹配评估。文献[11]在文献[10]的基础上提出了基于互信息与改进灰靶理论的电压暂降严重程度数据挖掘分析方法。但是文献[10]和文献[11]都采用了基于传统Apriori数据挖掘方法,Apriori算法在对数据库进行扫描之前会加载较多的候选集,导致其计算效率较低,而且采用电压暂降严重程度指标来评估暂降的严重程度,只考虑了系统侧的电压扰动,没有考虑敏感用户负荷特性。

针对上述情况,本文提出一种基于改进FP-Growth和层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)算法的数据挖掘分析方法来评估电压暂降影响度。对于评估区域电网的每次电压暂降事件,从电能质量监测记录中提取各节点的电压暂降特征属性,然后计算各节点对应的电压暂降影响度。运用数据挖掘方法挖掘电压暂降特征属性与电压暂降影响度之间的关联规则。对于任何实际的电压暂降场景,可以构造一组与该故障场景相对应的特征属性值,将该场景的特征属性与挖掘出的关联规则进行匹配,从而得到该场景下的电压暂降影响度。

本文所提方法选取电压暂降特征属性并对其进行分类,并且结合考虑电压暂降严重性和敏感用户负荷特性的影响度指标构建数据挖掘分析框架;采用改进的FP-Growth算法对电压暂降事件进行数据挖掘,该方法避免了传统FP-Growth算法产生无效规则的问题,有效提升了数据挖掘的效率;通过层次分析法构建关联规则匹配模型,对电压暂降影响度进行评估,提高了评估结果的准确性。最后,通过实例分析验证了所提方法的实用性。

1 数据挖掘准备

1.1 电压暂降特征属性

电能质量监测系统收集了大量反映电压暂降事件的数据,随着时间的积累最终形成了一个庞大的、信息丰富的数据库。在这些数据中,需要遵守一定的原则来筛选出与电压暂降严重程度相关的因素,以提高挖掘效率并且避免挖掘出

“无意义”的关联规则。本文选取如表1所示的6个维度因素参与和节点电压暂降影响度的关联规则挖掘。当然,用户也可以根据自身需求选取其他电压暂降特征属性。

表1 电压暂降特征属性

Tab.1 Characteristic attribute of voltage sag

特征属性	属性描述
观测位置	安装有电能质量监测装置的变电站的地理位置
电压等级	500 kV, 220 kV, 110 kV, 35 kV, 10 kV
天气	大雨、大风、小雨、晴、阴、雷阵雨、其他
故障原因	单相接地、两相接地、两相短路、三相短路、感应电机启动、变压器投切
季节	春季、夏季、秋季、冬季
时间	凌晨、早上、上午、中午、下午、晚上、半夜、深夜

在表1中,“观测位置”为变电站在电网中的地理位置;“电压等级”为关联母线的额定电压;“天气”为暂降发生时变电站位置处的天气情况;“故障原因”为引起此次暂降的原因;“季节”为暂降发生的季节;“时间”为暂降在一天当中发生的时间。

对于关联规则的挖掘而言,需要将电压暂降特征属性转化为定性量进行表示。在表1中,“电压等级”、“天气”、“故障原因”为定性的语言描述类数据;“季节”和“时间”可以根据社会生活习惯进行定性划分;对于“观测位置”数据,采用K-means聚类方法离散为东北、东南、中部、西北、西部、西南6个定性量。

1.2 电压暂降影响度

为了衡量电压暂降对敏感用户造成的影响,需要从电压暂降的严重程度和敏感用户负荷特性两个方面考虑。电压暂降的严重程度除了应考虑暂降的幅值和持续时间外,还应考虑敏感设备的电压耐受能力,本文采用不兼容度指标^[12]来衡量电压暂降的严重程度,该指标计算如下:

$$D_c = \frac{U_{\text{curve}}(t) - U}{1 - U_{\text{curve}}(t)} \quad (1)$$

式中: D_c 为不兼容度值; U 为电压幅值标幺值; t 为暂降持续时间; $U_{\text{curve}}(t)$ 为暂降持续时间为 t 时耐受曲线上的电压幅值标幺值,本文采用SEMI F47曲线。

对于敏感用户来说,除了考虑了电压暂降的严重程度,还需要考虑设备的优先级、容量和运行状态等敏感用户负荷特性。因此定义电压暂降影响度为

$$D_{ik} = D_c C_k \xi \omega \quad (2)$$

式中: C_k 为第 k 台设备容量占节点总容量的百分比; ξ 为设备故障率; ω 为负荷重要性权重系数。

根据敏感设备的电压耐受曲线,如图1所示,采用考虑能量损失的设备故障敏感度概率模型,基于能量损失计算设备故障率 ξ ^[8]。敏感设备的耐受曲线可以通过实验获取^[13]。

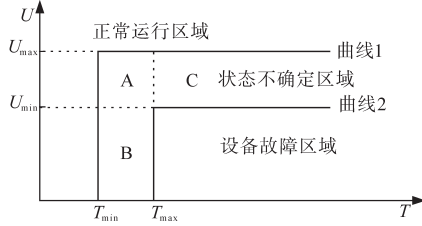


图1 敏感设备耐受曲线

Fig.1 The tolerance curve of sensitive equipment

图1中, $U_{\max}$, $U_{\min}$ 为敏感设备对暂降电压的耐受阈值; $T_{\max}$, $T_{\min}$ 为敏感设备对暂降持续时间的耐受阈值。敏感设备对电压暂降的响应可分为正常运行区域、设备故障区域和不确定区域。曲线1的外部区域($U > U_{\max}$, $T < T_{\min}$)为设备正常运行区域;曲线2的内部区域($U < U_{\min}$, $T > T_{\max}$)为设备故障区域;曲线1和曲线2之间为设备运行不确定区域,包括A区域($U_{\min} < U < U_{\max}$, $T_{\min} < T < T_{\max}$)、B区域($U < U_{\min}$, $T_{\min} < T < T_{\max}$)和C区域($U_{\min} < U < U_{\max}$, $T > T_{\max}$)三个部分。

实际电压暂降位于负荷耐受曲线的位置是随机的,即 U , T 必定满足累积分布概率函数。而对敏感设备而言,设备故障与否取决于暂降能量损失大小,用能量损失公式 $E = T \cdot (U_{\max}^2 - U^2)$ 构造累积分布函数则可得设备故障率计算公式为

$$\xi_1 = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (U, T) \in A \quad (3)$$

$$\xi_2 = \frac{U_{\max}^2 - U^2}{U_{\max}^2 - U_{\min}^2} \quad (U, T) \in B \quad (4)$$

若B区域和C区域内随机变量 T , U 的概率密度分别为 $f_x(U)$, $f_y(T)$,则A区域内随机变量 U , T 的联合概率密度函数为 $f_{x,y}(T, U) = f_x(U)f_y(T)$,所以可得A区域内的设备故障率计算公式为

$$\xi_3 = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \cdot \frac{U_{\max}^2 - U^2}{U_{\max}^2 - U_{\min}^2} \quad (U, T) \in C \quad (5)$$

若该节点上连接有多种敏感设备,则该节点电压暂降的综合影响度为

$$D_1 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m D_{1k} \quad (6)$$

式中: D_{1k} 为第 k 台设备的影响度; m 为第 j 种设备的总台数; n 为敏感设备的种类。

根据电压暂降综合影响度的大小,将其划分为5个等级:优($0 \leq D_1 < 1$)、良($1 \leq D_1 < 2$)、中($2 \leq D_1 < 3$)、较差($3 \leq D_1 < 4$)、差($D_1 \geq 4$)。

2 关联规则挖掘

2.1 关联规则概述

关联规则形式为: $X \rightarrow Y$,其中 $X \cap Y = \emptyset$ ^[14]。通常采用支持度($S(X \rightarrow Y)$)和置信度($C(X \rightarrow Y)$)两个指标来进行关联规则的挖掘,其中规则支持度表示规则在数据库中出现频率,规则置信度表示规则的可靠性。二者的计算公式为

$$S(X \rightarrow Y) = P(X \cup Y) = \frac{N(X \cup Y)}{N(D)} \quad (7)$$

$$C(X \rightarrow Y) = P(Y/X) = \frac{P(X \cup Y)}{P(X)} \quad (8)$$

式中: $N(X \cup Y)$ 为同时包含 X 和 Y 的事务的数目; $N(D)$ 为数据库 D 包含事务的数目。

式(7)表示同时包含 X 和 Y 的事务数占数据库 D 中事务的比值;式(8)为在数据库 D 中同时包含 X 和 Y 的事务占有所有包含 X 的事务的比值。

2.2 改进FP-Growth算法

FP-Growth算法^[15]将数据库中转化为一棵频繁模式树(frequent pattern tree, FP-Tree),在保留原数据库中各项目间关联信息的同时,实现了数据库的压缩,并且提高了数据挖掘效率。相较于传统的关联规则挖掘Apriori算法,该算法不会产生候选项集,并且可以减少扫描数据库的次数,可以有效提高挖掘效率,尤其在数据库较大时^[16]。

传统的FP-Growth算法可以挖掘任意属性之间的关联规则,对于关联特性的条件和结果没有限制。但是,当采用关联规则来评估电压暂降的影响度时,关联规则的结果必须是电压暂降的影响度指标,而条件为电压暂降特征属性。所以采用传统的FP-Growth算法挖掘特征属性与影响度指标时会产生大量的无效规则^[17],所以本文提出一种改进的FP-Growth算法以避免这种情形,算法的步骤如下:

1)扫描数据库,找出并统计每个特征属性项出现的次数。根据特征属性项出现的次数进行降序排列以得到特征属性项频繁列表,同时删除不满足设定最小支持度的数据项。以表2中数据集为例,数据项a,b,c,d,e和f为特征属性项,数据项g和h为影响度指标项,扫描全部特征属性项并计算出不同数据项出现的频次。其中特征

属性项a出现了6次,特征属性项c和b出现了5次,特征属性项e出现了4次,特征属性项d出现了3次,而特征属性项f则出现了1次。设定最小支持度为0.25,亦即项目最少出现次数为2次。

表2 数据库Tid表

Tab.2 Tid table of database

项目名	频繁项集	项目名	频繁项集
1	b,c,d,g	5	b,c,a,h
2	e,a,d,g	6	e,a,d,g
3	e,a,f,g	7	c,b,a,h
4	a,d,c,h	8	c,e,b,g

2)将所得满足最小支持度的特征属性项放到频繁项集表中,如表3所示。按照每个特征属性项出现的次数将表2中数据集从大到小进行重新排序,且将影响度指标排到末尾,重新排列后的数据库如表4所示。

表3 频繁项集表

Tab.3 Frequent itemsets table

项目名	频繁项集	项目名	频繁项集
a	6	e	4
c	5	d	3
b	5		

表4 整理后数据库Tid表

Tab.4 The restructured Tid table of database

项目名	频繁项集	项目名	频繁项集
1	c,b,d,g	5	a,c,b,g
2	a,e,d,g	6	a,e,d,g
3	a,e,f,g	7	a,c,b,h
4	a,c,b,h	8	c,b,e,g

3)再一次扫描数据库,创建FP-Tree的根节点,以Null表示。将再次扫描所得的每条事务按照频繁项列表的排列顺序(影响度指标排到末尾)插入到FP-Tree中,以此来创建一条路径。如果在建立FP-Tree的过程中出现了相同项,则在相关项的节点数上加1。根据整理后的数据列表4,按照表3给出特征属性项顺序依次将表4中的项目集加入FP-Tree中,即可得到如图2所示的树状图。

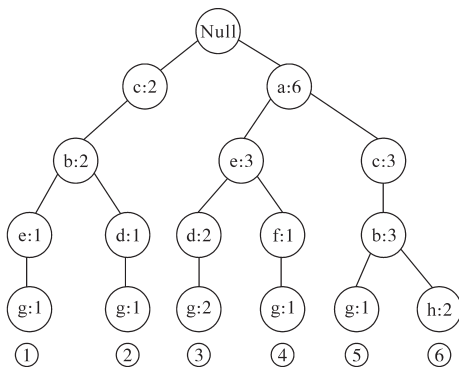


图2 FP-Tree树状图

Fig.2 FP-Tree graphs

4)对于图2所示的每一条树枝,统计尾节点影响度指标项数目。若该节点指标项数目满足最小支持度,则将此节点为结尾的路径与影响度指标项作为候选规则输出。其中,影响度指标项的数目占总事件数目的比值为该规则的支持度,影响度指标项的数目与上一节点特征属性项的数目之比为该规则的置信度。

如树枝③节点的影响度指标项g的数目为2,满足最小支持度,且置信度为1。则a,e,d,g作为候选规则集。根据图2得到的候选规则集如表5所示。

表5 候选规则集

Tab.5 Candidate rulesets

项目名	频繁项集	项目数	支持度	置信度
1	a,e,d,g	2	0.25	1
2	a,c,b,h	2	0.25	0.667

3 关联规则匹配模型

对于挖掘出的关联规则,若要用于指导实际生产,则还需要与实际故障场景相匹配,通过建立合适的匹配模型,在与实际场景不完全相同时,输出相似结果。

本文采用层次分析法来构建关联规则的匹配模型,采用层次分析法^[18-19]构建关联规则匹配模型的步骤如下:

1)根据实际场景与关联规则匹配体系,将匹配度最大确定为目标层,将电压暂降特征属性各维度隶属度确定为准则层,挖掘出的关联规则库为方案层。

2)根据指标层各指标间的关系确定判断矩阵。通过文献[18]中的标度来定义判断矩阵A。最后构成判断矩阵A中元素的定义如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:n为指标数目。

3)由判断矩阵A得到该矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及其对应的特征向量 ξ ,将特征向量进行归一化以得到权重矩阵W:

$$W = [w_1 \cdots w_i \cdots w_n] \quad (10)$$

式中: w_i 为第i个指标的权重。

4)检验判断矩阵的一致性比率是否满足要求,首先通过最大特征值 $\lambda_{\max}$ 和指标数目n计算一致性指标CI,计算公式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

然后查找文献[18]中一致性指标 RI , 并计算一致性比例 CR , 计算公式如下:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (12)$$

当 $CR < 1.0$ 时, 则判断矩阵满足要求, 否则应适当修正判断矩阵, 重新计算一致性比例 CR , 直至满足要求为止。

5) 计算关联规则暂降特征属性各维度隶属度, 通过权重矩阵 W 计算关联规则与实际场景之间的匹配度, 计算公式如下式:

$$P(k) = \sum_{i=1}^n w_i \mu_{ki} \quad (13)$$

式中: μ_{ki} 为第 k 条关联规则第 i 个特征属性隶属度。根据匹配度的大小对关联规则进行排序, 并将匹配度最大的关联规则作为结果输出。

4 算例分析

4.1 关联规则有效性验证

以某电力公司电能质量监测记录为原始数据, 提取电压暂降的特征属性作为事件分析的历史数据库。该数据库时间跨度为2016年1月—2019年12月, 包括220 kV及以上母线节点99个, 其他节点402个。

使用K-MEANS聚类方法对电压暂降观测位置的经纬度值进行聚类, 得到6个定性部分。根据当地气象局信息记录得到暂降时的天气信息。由监测数据得到每次暂降事件的故障原因和时间信息, 并进行分类。结合故障事件报告、监测数据与电网拓扑, 计算所有事件所有母线节点的电压幅值; 并根据已知历史暂降事件的电压幅值、持续时间与敏感设备耐受能力, 结合关心节点所接敏感负荷特性, 计算该节点电压暂降影响度。

为验证关联规则的有效性, 将2016年1月—2018年12月的数据作为训练样本集, 建立电压暂降影响度数据库。再以2019年1月—2019年12月的数据作为测试集, 进行关联规则的匹配与验证。当依据2016年—2018年数据库挖掘出的关联规则在2019年的暂降事件中仍具有相似的置信度时, 则说明挖掘出的关联规则可以指导用户采取相应措施降低损失。

首先对作为训练样本集的数据进行数据挖掘, 从挖掘出的关联规则内随机选取30条关联规则, 参考式(8)定义关联规则在测试集中的置信度 $C_s(i)$ 和定义准确率 $\eta(i)$, 如下式所示:

$$C_s(i) = \frac{N(X_i \rightarrow Y_i)}{N(X_i)} \quad (14)$$

$$\eta(i) = 1 - \frac{|C(i) - C_s(i)|}{C(i)} \quad (15)$$

式中: $N(X_i)$ 为测试场景中满足故障场景 X_i 各暂降特征属性的节点电压暂降记录数; $N(X_i \rightarrow Y_i)$ 为满足关联规则 $X_i \rightarrow Y_i$ 各暂降特征属性的节点电压暂降记录数; $C(i)$ 为关联规则自身置信度; $C_s(i)$ 为关联规则在测试集中的置信度。

选取的30条关联规则的置信度和准确率如图3所示。规则自身置信度 $C(i)$ 与规则在测试集中置信度 $C_s(i)$ 具有相同的变化趋势; 准确率 $\eta(i)$ 在95%附近波动。说明挖掘出的关联规则不局限于所挖掘的数据库, 具有普遍性。

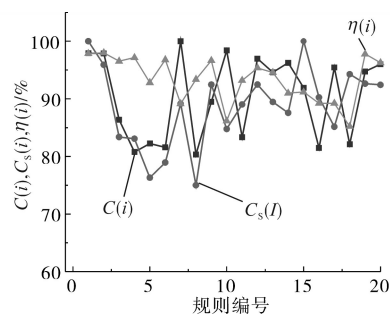


图3 关联规则准确率

Fig.3 Association rule accuracy

4.2 关联规则匹配模型

针对区域内某关心节点, 设置其故障场景为{东南, 110 kV, 冬季, 早上, 阴, 单相接地}, 将故障场景与关联规则库中各规则进行匹配, 当特征属性相同时, 隶属度取1, 其他情况都取0。运用层次分析法获得特征属性各维度隶属度权重如表6所示。根据表6中各特征属性隶属度的权重计算关联规则的匹配度, 根据匹配度的大小输出关联规则, 匹配结果如表7所示。

表6 特征属性隶属度权重

Tab.6 The weight of membership degree of characteristic attribute

特征属性	观测位置	电压等级	天气	故障原因	季节	时间
权重	0.106	0.415	0.208	0.135	0.084	0.052

表7 关联规则匹配结果

Tab.7 The match result of the association rule

序号	关联规则	置信度	匹配度
1	{东南, 110 kV, 冬季, 早上, 阴, 单相接地} → {优}	0.906	1.000
2	{东南, 110 kV, 冬季, 中午, 阴, 单相接地} → {优}	0.803	0.948
3	{西北, 110 kV, 冬季, 早上, 阴, 单相接地} → {良}	0.913	0.894

根据表7可以得出在此故障场景下的电压暂降影响度。序号1的关联规则具有较高的置信度和匹配度,可以用序号1对应的关联规则中的电压暂降影响度等级衡量该节点在此故障场景下的电压暂降严重程度。即该节点在此故障场景下的电压暂降严重程度为“优”,说明在此故障场景下发生电压暂降对该节点所接用户影响较小。

5 结论

本文提出一种基于FP-Growth算法和层次分析法的数据挖掘分析方法来评估电压暂降影响度。所提方法可以挖掘电压暂降特征属性与电压暂降影响度之间的关联规则,并且可以通过将实际故障场景与挖掘出的关联规则相匹配来获得该故障场景下的电压暂降影响度。同时,根据挖掘出的关联规则还可以指导敏感用户选择合适的入网点。最后,通过实例分析验证了所提方法的实用性。

但是,与电压暂降影响度相关的特征属性较多,仅根据文中提到的特征属性无法完整地进行描述。因此如何选取合适的电压暂降特征属性将会是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 唐艳林,杨洪耕.基于最大熵原理的敏感负荷电压暂降故障频次研究方法[J].电测与仪表,2015,52(18):27-30.
Tang Y L, Yang H G. Research method of voltage sag fault frequency of sensitive load based on maximum entropy principle[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2015, 52(18):27-30.
- [2] Xiao X Y, Ma Y Q, Zhang Y, *et al.* Premium power valuation method based on customer perception of utility for high technology manufacturing customers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4):1655-1662.
- [3] Xu Y, Wu Y, Zhang M, *et al.* Sensitivity of programmable logic controllers to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1):2-10.
- [4] 杨晓东,李庚银,周明,等.电压暂降随机预估的自适应信赖域方法[J].中国电机工程学报,2011,31(4):39-44.
Yang X D, Li G Y, Zhou M, *et al.* Adaptive trust region method for random estimation of voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4):39-44.
- [5] Zambrano X, Hernandez A, Izzeddine M, *et al.* Estimation of voltage sags from a limited set of monitors in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2):656-665.
- [6] 曾江,蔡东阳.基于组合权重的蒙特卡洛电压暂降评估方法[J].电网技术,2016,40(5):1469-1475.
- [7] 陶顺,李玲,韦永忠,等.计及暂降的供电可靠性评估方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(5):151-156,163.
Tao S, Li L, Wei Y Z, *et al.* Research on power supply reliability evaluation method considering sags[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2019, 40(5):151-156,163.
- [8] 周翔,王丰华,黄荣辉,等.考虑系统与敏感设备的变电站电压暂降综合评估[J].中国电机工程学报,2015,35(8):1940-1946.
Zhou X, Wang F H, Huang R H, *et al.* Comprehensive evaluation of substation voltage sag considering system and sensitive equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8):1940-1946.
- [9] 俞骁,杨洪耕.兼顾系统侧和用户侧的节点电压暂降严重程度综合评估方法[J].水电能源科学,2019,37(10):150-154.
Yu X, Yang H G. Comprehensive evaluation method for the severity of node voltage sags on both the system side and the user side[J]. Hydropower Energy Science, 2019, 37(10):150-154.
- [10] 沈翔,杨洪耕,段晨.基于灰靶理论与云模型的电压暂降事件数据挖掘分析方法[J].电网技术,2019,43(2):722-731.
Shen X, Yang H G, Duan C. Data mining and analysis method for voltage sag events based on gray target theory and cloud model[J]. Power System Technology, 2019, 43(2):722-731.
- [11] 浦雨婷,杨洪耕,马晓阳.基于数据挖掘与改进灰靶的电压暂降严重程度分析与评估[J].电力系统自动化,2020,44(2):198-213.
Pu Y T, Yang H G, Ma X Y. Analysis and evaluation of voltage sag severity based on data mining and improved gray target[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2):198-213.
- [12] 贾清泉,艾丽,董海艳,等.考虑不确定性的电压暂降不兼容度和影响度评价指标及方法[J].电工技术学报,2017,32(1):48-57.
Jia Q Q, Ai L, Dong H Y, *et al.* Evaluation index and method of voltage sag incompatibility and influence degree considering uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1):48-57.
- [13] 汪颖,陈春林,肖先勇,等.电压暂降敏感设备耐受能力自动测试方法[J].电力系统自动化,2020,44(20):194-204.
Wang Y, Chen C L, Xiao X Y, *et al.* Automatic test method for the withstand capability of voltage sag sensitive equipment[J]. Power System Automation, 2020, 44(20):194-204.
- [14] Sheng G, Hou H, Jiang X, *et al.* A novel association rule mining method of big data for power transformers state parameters based on probabilistic graph model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9(2):695-702.
- [15] 朱逸群,杨霖,曹国瑞,等.基于自适应FP-Growth算法的电表故障分析[J].科学技术与工程,2019,19(28):172-178.
Zhu Y Q, Yang L, Cao G R, *et al.* Fault analysis of electric energy meters based on adaptive FP-Growth algorithm[J]. Science

(下转第80页)

基于分数阶滤波系统的LoRa新型抗干扰 SF₆密度继电器

刘畅,郭帅,武倩男

(国网河北省电力有限公司检修分公司,河北 石家庄 050000)

摘要:随着中国超特高压的迅速发展,SF₆气体密度继电器在各类电压等级设备中广泛应用。由于电网设备所处的电磁环境复杂,现有SF₆气体密度继电器无法将各类信息准确远传,因此研究一种新型抗干扰远传式SF₆气体密度继电器具有重要的意义。介绍了SF₆气体密度继电器的基本原理,并以分数阶滤波系统为基础,提出了一种新型抗干扰SF₆气体密度继电器,并通过现场试验验证了该设备的可靠性。

关键词:分数阶滤波系统;远距离无线电技术;抗干扰;SF₆气体密度继电器

中图分类号:TM133 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22257

The New LoRa Anti-interference SF₆ Gas Density Relay Based on Fractional Order Filtering System

LIU Chang, GUO Shuai, WU Qiannan

(State Grid Hebei Maintenance Branch, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: With the rapid development of ultra-high voltage in China, SF₆ gas density relay is widely used in various voltage level equipment. Due to the complex electromagnetic environment of power grid equipment, the existing SF₆ gas density relay can not transmit all kinds of information accurately, so it is of great significance to study a new type of anti-interference remote transmission SF₆ gas density relay. The basic principle of SF₆ gas density relay was introduced. Based on the fractional order filtering system, a new anti-interference SF₆ gas density relay was proposed. The reliability of the device was verified by field test.

Key words: fractional order filtering system; long range radio (LoRa); anti-interference; SF₆ gas density relay

SF₆气体密度继电器是用来检测高压电器设备中SF₆气体密度的变化情况,广泛用于SF₆断路器、互感器、避雷器、电容器、电缆等单一设备中,也用于气体绝缘封闭式组合电器、插接式开关系统等组合电器设备中,其密度数据能否准确获取直接影响高压电器设备的安全稳定运行。传统SF₆气体密度继电器数据获取需要人工进行设备全面巡视,设备的增多会导致工作量及巡视误差的增大。部分变电站虽装有SF₆气体密度在线监测系统,由于设备所处电磁环境噪声复杂,导致通过在线监测系统获取的SF₆气体密度数据并不准确^[1-4]。

为此,研究数据准确的新型抗干扰远传式SF₆气体密度继电器对突破传统运检模式的信息获取方式、提升数据精准性、保证设备安全稳定具有重要意义。

1 SF₆气体密度继电器

传统SF₆气体密度继电器是由带报警和闭锁触点的密度表或密度表与继电器合二为一组成,可以直观地监测SF₆气体的压力情况。当电器设备内的SF₆气体密度下降至压力报警值时,SF₆密度继电器发出报警信号;当电器设备内的SF₆气体密度下降至压力闭锁值时,SF₆密度继电器发出闭锁信号^[5]。

根据结构可将SF₆气体密度继电器分为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ型^[6]。Ⅰ型SF₆气体密度继电器主要用于早期高压电气设备,由感温包、微动开关、杠杆及波纹管组成,其原理是:设备工作于额定气压时杠杆平衡;当温度变化时两组波纹管气压等幅变化,实现温度补偿;当设备内SF₆漏气时波纹管压缩,发出报警信号;若补气不及时,会触发闭锁

信号进而闭锁。

I型继电器的感温包大多置于机构箱内,并且箱内与高压设备内部SF₆温度通常不等,造成继电器误报情况频繁发生。II型密度继电器在I型的基础上,减少波纹管的个数,并配合SF₆真空压力表进行检测。由于同样安装于机构箱内,误报情况仍然频繁发生。III和IV密度继电器将真空压力表与SF₆密度继电器进行组合,利用压力检测弹簧管检测设备内SF₆气体压力,利用膨胀系数不同的双金属片进行温度补偿并达到平衡,进而减少了继电器的误报^[6]。但由于双金属片特性,对继电器精度有一定影响。IV型密度继电器在III型基础上加入温度补偿弹簧管,使得可靠性进一步提升。

现有大部分变电站高压电器设备SF₆密度信息需要传统人工巡视获取,无法在主控制室直接获取。此外,部分变电站中密度继电器虽装有SF₆密度在线监测系统或采用有线传输SF₆气体密度继电器^[7],由于元件设备所处电磁环境较为复杂,其数据采集存在一定误差,严重情况会导致误判甚至设备已发生故障而未收到报警信息,对电网安全稳定运行造成极大影响。

2 基于LoRa的远传式SF₆气体密度继电器

为了解决现有SF₆气体密度继电器存在的问题,特别是在复杂电磁环境下无法准确采集气体密度数据的问题,本文研究一种基于远距离无线电技术(long range radio, LoRa)的抗干扰远传式SF₆气体密度继电器。LoRa是基于低功耗广域网络的远距离无线电技术^[8-10]。与传统传输方式相比,LoRa具有传播距离远、低功耗、准确精度高的特点。LoRa通信技术的特性如表1所示。

表1 LoRa通信技术特性

Tab.1 LoRa communication technology characteristics		
序号	属性	特点
1	传输距离	城镇:2~5 km;郊区:15 km
2	功耗	很低
3	容量	一个LoRa网关可以连接上万个LoRa节点
4	电池寿命	长达10 a
5	标准	IEEE 802.15.4g

在高压电器设备的SF₆密度继电器上布置集成LoRa通信组件的数据采集传感器,传感器通过LoRa组件与布置在类端的LoRa基站通信;LoRa基站可以通过多跳的方式进行组网,将传感器处获得的感知数据通过电力光纤网回传至电力内

网,并利用云平台处理利用,整体网络主架构如图1所示。

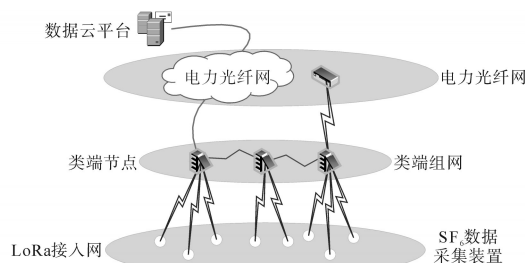


图1 基于LoRa的远传式SF₆密度继电器网络主架构

Fig.1 Main architecture of remote SF₆ density relay network based on LoRa

1)LoRa接入网:SF₆数据采集装置通过“多对一”的方式接入到类端节点。在标准的LoRa WAN通信协议基础上,针对SF₆数据采集传感器的使用特点,进行协议裁剪和优化。

2)类端组网:类端节点间通过无线多跳实现信息传输,具备自组网、自适应路由等功能,优化数据的调度和传输质量。

3)电力光纤网:利用成熟的电力光纤网技术,在类端加装终端模块,实现类端接入电力专网能力;或者利用变电站已铺设电力光纤网,通过有线接入方式并经加密和防火墙,实现电力内网的接入。

根据LoRa通信技术容量大特点,1个类端节点可以连接上万个数据采集信号,即在采集SF₆数据信号的基础上,可以获得大量元件信息,进而组成SF₆数据信息电力物联网,实现电网高压电器设备信息的有效获取。

2.1 远传式SF₆密度继电器数据感知装置

SF₆密度继电器数据感知装置一般由感知、处理、通信和供电这4个基本功能模块组成,总体架构设计如图2所示。数据感知装置连接于SF₆密度继电器本体下部。

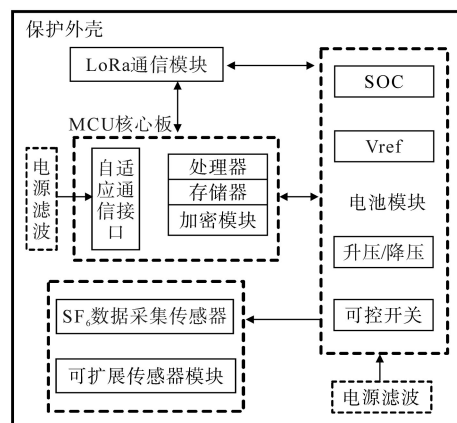


图2 数据感知装置总体架构设计

Fig.2 Overall architecture design of data sensing device

基于LoRa的嵌入式数据感知装置,采用模块化、芯片化设计技术提高装置的集成度。将传感器模块和核心板(microcontroller unit, MCU)的接口标准化,使各类传感器可以接入同一个MCU核心板,MCU核心板是数据感知装置算法和通信协议的载体。低功耗高能电池管理模块包括用于切除传感器模块的可控开关、用于调节不同类型传感器供电电压的升压和降压模块、用于为传感器提供稳定参考电压的V_{ref}模块以及用于电池管理的模块(system on chip technology, SOC)。LoRa通信模块为传感器数据与基站进行通信。

2.2 远传式SF₆气体密度继电器类端设计

远传式SF₆气体密度继电器的类端节点应用场景根据电压等级或设备类型进行区域划分。

根据电压等级进行区域划分时,同一电压等级电气间隔末端设置类端节点,收集该电压等级内不同设备SF₆气体密度继电器数据。图3所示为220 kV电压等级GIS设备每个电气间隔装设1个SF₆气体密度继电器类端,该类端收集220 kV电气间隔三相设备中SF₆密度继电器的数据信息。图中虚线框表示采集传感器设计位置,采用无线传输的方式将数据传递至该电压等级类端节点。不同的电压等级类端节点进行组网,并通过电力光纤网传至数据云平台。

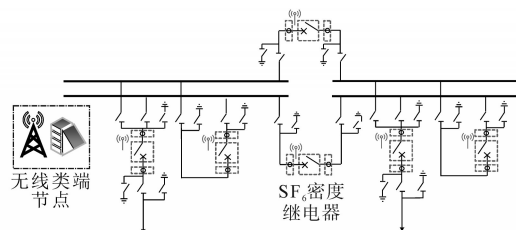


图3 220 kV电压等级GIS设备无线类端节点设计

Fig.3 Design of wireless end node of 220 kV voltage grade GIS equipment

该型区域划分的类端节点设计方式可以横向获得同一电压等级不同设备的SF₆数据信息,提升了该电压等级下设备状况分析效率。根据电压等级进行区域划分的类端节点可以广泛适用于各种电压等级变电站。

根据设备类型进行划分的设计原理图如图4所示。该型区域划分的类端设计方式,可以纵向获得同一类型设备在不同电压设备区的SF₆数据信息。根据设备类型进行区域划分时,类端节点收集不同电压等级电气间隔同类型设备的SF₆气体密度继电器数据。例如1 000 kV特高压变电站中,断路器类端节点可分别收集1 000 kV,500 kV,

110 kV,35 kV电压等级中各三相断路器的SF₆密度数据信息,见图4。隔离开关类端节点可收集不同电压等级中各三相隔离开关的SF₆密度数据信息,不同设备类端节点进行组网,并传至数据云平台。

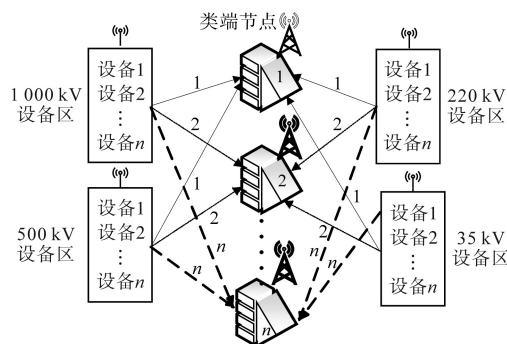


图4 设备型无线类端节点设计

Fig.4 Design of device type wireless end node

3 基于分数阶滤波系统的SF₆气体密度继电器

通过电器设备外壳、信号线、电源端口、控制线、地线等方式形成电磁干扰是电器设备在复杂电网环境下所受电磁干扰的主要方式^[1]。在远传式气体密度继电器的远传部分中,电源的地位极其重要。来自电网的干扰信号主要通过电子远传部分或数据采集传感器的供电电源等耦合串入远传密度继电器。此外,作为SF₆气体密度继电器的重要数据源头,SF₆气体压力或温度等数据采集传感器在接入MCU核心板前,其信号会受到来自地以及其两级间的硬件干扰。基于以上分析,提高SF₆气体密度继电器抗干扰性的重要原则是阻止干扰信号的传播。

本节从供电电源干扰以及硬件干扰两个重要方面出发,研究基于分数阶滤波系统的远传式SF₆气体密度继电器。

3.1 基于分数阶噪声滤波器的电源抗干扰处理

传统噪声滤波器是根据电感和电容的特性将其并联或串联入电源电路。虽然电路中电感和电容元件数的增多会一定程度降低电源电路中的干扰信号,但元件数的增多也会加大电路设计与实现难度。随着分数阶电路系统的发展,分数阶元件可以获得更多的电路特性及更大的设计自由度^[12-14]。

在电源输入端增加分数阶电源噪声滤波器,其等效电路图如图5所示。其中,电源输入端的正负接地电阻并入R_s,电源等效为一个负载R_L的

分数阶滤波电路。图中, P,N,P',N' 分别代表分数阶噪声滤波器的输入端口以及输出端口。

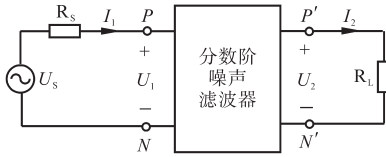


图5 电源等效电路图

Fig.5 Equivalent circuit diagram of power supply

分数阶噪声滤波器由分数阶差模及分数阶共模两部分组成,其电路原理如图6所示。其中,分数阶电容 $C_{\alpha 1}, C_{\alpha 2}$ 的阶次为 α_1, α_2 ,分数阶电感 $L_{\beta 1}, L_{\beta 2}$ 的阶次为 β_1, β_2 。分数阶差模及共模分别用来衰减交流进线上的差模及共模干扰噪声。

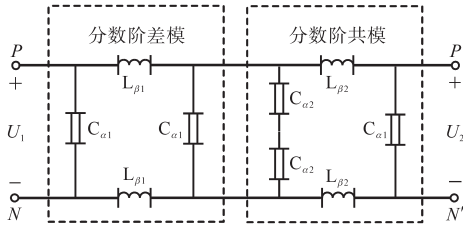


图6 分数阶噪声滤波器电路原理图

Fig.6 Schematic diagram of fractional-order noise filter circuit

根据图6的分数阶噪声滤波器电路,可以得到输出电压 U_2 如下式所示:

$$U_2 = U_s [(R_L + R_s R_L + \omega^{\beta_2} L_{\beta 2} + \omega^{\beta_1} L_{\beta 1} R_L + R_s R_L \omega^{\alpha_2} C_{\alpha 2} + \omega^{\alpha_2 + \beta_2} R_s L_{\beta 2} C_{\alpha 2} + \omega^{\alpha_2 + \beta_1} R_L L_{\beta 1} C_{\alpha 2} + \omega^{\alpha_2 + \beta_1 + \beta_2} L_{\beta 1} L_{\beta 2} C_{\alpha 2}) / (R_s + \omega^{\beta_2} L_{\beta 2})] \quad (1)$$

式中: ω 为干扰信号角频率。

利用阻抗匹配法,使得分数阶噪声滤波器对高频传导干扰具有最大损耗。

对传统噪声滤波器及分数阶噪声滤波器分别施加频率 $\omega = 50 \text{ rad/s}$ 的正弦电压,通过仿真测量电源输入端端口电流。传统噪声滤波器及分数阶噪声滤波器的响应特性分别如图7、图8所示。

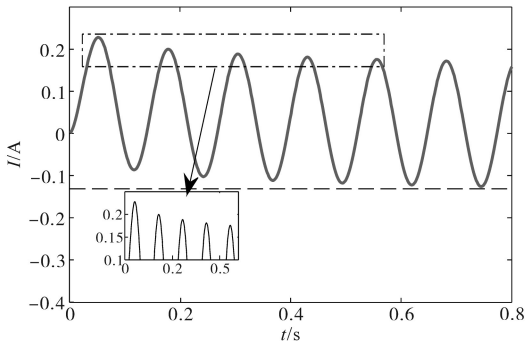


图7 传统噪声滤波器响应特性

Fig.7 Response characteristic of traditional noise filter

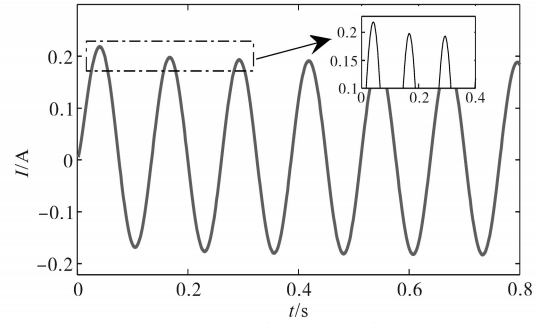


图8 分数阶噪声滤波器响应特性

Fig.8 Response characteristic of fractional-order noise filter

由图7、图8可以得出,传统噪声滤波器的电源响应特性需要大约5个周期约0.7s达到稳态,同时其波峰及波谷相差较大;相同条件下分数阶噪声滤波器的电源响应特性仅需要2个周期约0.2s达到稳态,同时其波峰及波谷相差很小。现场复杂电源环境下两种滤波器的电源响应特性之间差距更大,分数阶噪声滤波器更适合复杂环境下的电源抗干扰处理。

此外,给定相同输入信号,传统噪声滤波器与分数阶噪声滤波器的插入损耗如图9所示。由图可知,传统噪声滤波器的频率特性范围较窄(曲线斜率较小),分数阶噪声滤波器的频率特性范围较宽(曲线斜率较大)。传统噪声滤波器的衰减频率及通过频率的选择度较低,有可能导致部分信号衰减或噪声没有彻底去除。分数阶噪声滤波器频率的选择度较高,SF₆气体密度继电器各类数据可以在几乎不衰减的状态下去除噪声。

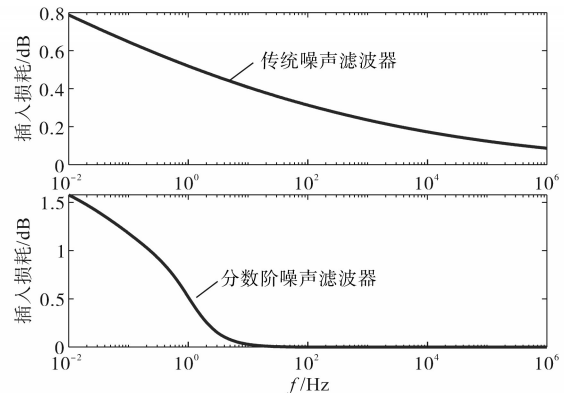


图9 传统噪声滤波器与分数阶噪声滤波器插入损耗对比

Fig.9 Comparison of insertion loss between traditional noise filter and fractional-order noise filter

如表2所示,选取不同分数阶次,分数阶噪声滤波器的插入损耗如图10所示。由图可知,随着阶次的升高,分数阶滤波器频率特性范围越大。此外,SF₆气体密度继电器可以根据安装位置所处的不同噪声环境,选取适当分数阶滤波阶次,达到更好的预期滤波效果。值得一提的是,随着

分数阶电容、电感的研究及开发,大部分分数阶元件均可在市场中购买到,或通过整数阶电容、电感进行高阶逼近而实现。

表2 分数阶噪声滤波器阶次

Tab.2 Orders of fractional-order noise filter

	α_1	α_2	β_1	β_2
EX ₁	0.1	0.15	0.3	0.35
EX ₂	0.2	0.25	0.6	0.65
EX ₃	0.3	0.35	0.9	0.95
EX ₄	0.4	0.45	1.2	1.25

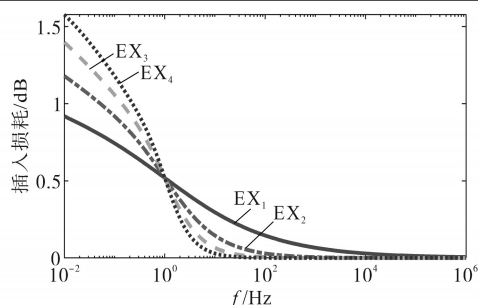


图10 不同阶次分数阶噪声滤波器插入损耗

Fig.10 Insertion loss of fractional-order noise filters with different order

3.2 基于分数阶切比雪夫滤波器的硬件抗干扰处理

对于传统SF₆气体密度继电器的硬件抗干扰处理,通常是在SF₆气体压力或温度等数据采集传感器信号接入MCU核心板前,通过信号线与地间并联电容来减少共模干扰;通过信号两极间的传统滤波器来减少差模干扰。因为电磁干扰的特性较为复杂并体现出了分数阶的特性,利用并联传统整数阶电容及电感、传统整数阶滤波器的方法无法更好地解决硬件抗干扰问题。本小节利用分数阶切比雪夫滤波器对硬件抗干扰问题进行研究。

在SF₆气体压力或温度等数据采集传感器信号输出端增加分数阶切比雪夫滤波器,其等效电路如图11所示。其中, U_o 、 U_{in} 分别为数据采集传感器信号输出端电压及MCU核心板输入端电压; R_o 、 R_{in} 分别为数据采集传感器信号输出端等效电阻及MCU核心板输入端等效电阻。



图11 硬件抗干扰等效电路图

Fig.11 Equivalent circuit diagram of hardware anti-interference

分数阶切比雪夫抗干扰滤波器的电路原理

图如图12所示,其中分数阶电容 $C_{\alpha 1}$ 、 $C_{\alpha 2}$ 的阶次分别为 α_1 、 α_2 。

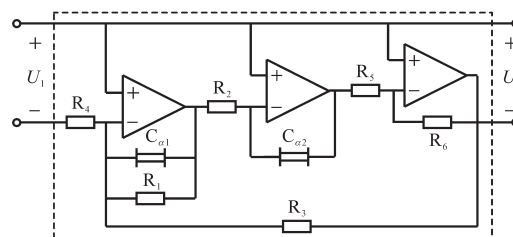


图12 分数切比雪夫抗干扰滤波器电路原理图

Fig.12 Schematic diagram of fractional-order Chebyshev anti-interference filter

根据图12的分数切比雪夫滤波器电路,结合电网络理论可以得到输出电压 U_2 如下式所示:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_3 R_5 / R_4 R_6}{\omega^{\alpha_1 + \alpha_2} R_2 R_3 C_1 C_2 + \omega^{\alpha_2} (R_2 R_3 C_2 / R_1) + 1} \quad (2)$$

给定相同输入信号,传统硬件抗干扰滤波与分数阶切比雪夫抗干扰滤波的插入损耗如图13所示。由图可知,传统硬件抗干扰滤波的频率特性范围较窄(曲线斜率较小),分数阶切比雪夫抗干扰滤波的频率特性范围较宽(曲线斜率较大)。传统硬件抗干扰滤波的衰减频率及通过频率的选择度较低,有可能导致部分硬件干扰无法彻底去除。分数阶切比雪夫抗干扰滤波频率的选择度较高,SF₆气体压力或温度等数据采集传感器信号可以在衰减极少的状态下去除硬件干扰。

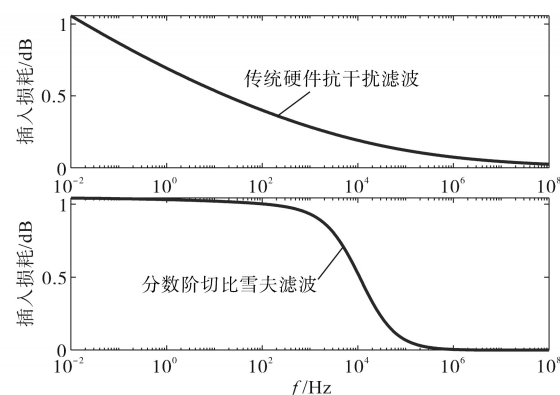


图13 传统硬件抗干扰滤波与分数阶切比雪夫抗干扰滤波插入损耗对比

Fig.13 Comparison of insertion loss between traditional hardware anti-interference filter and fractional-order Chebyshev anti-interference filter

如表3所示,选取不同分数阶次,分数阶切比雪夫抗干扰滤波器的插入损耗如图14所示。

表3 不同阶次分数阶切比雪夫滤波器参数

Tab.3 Parameters of fractional-order Chebyshev

filter under different orders

元件参数	EX ₁	EX ₂	EX ₃
	$\alpha_1 = 0.6$ $\alpha_2 = 0.2$	$\alpha_1 = 0.8$ $\alpha_2 = 0.5$	$\alpha_1 = 1.0$ $\alpha_2 = 0.8$
$C_{a1}/\mu\text{F}$		0.159	
$C_{a2}/\mu\text{F}$	173.9	12.6	0.915
$R_1/\text{k}\Omega$	5.095	12.147	3.001
R_2/Ω	679.8	1 702.5	2 150.1
R_3/Ω	749.5	713.5	710.7
$R_4, R_5, R_6/\Omega$		1 000	

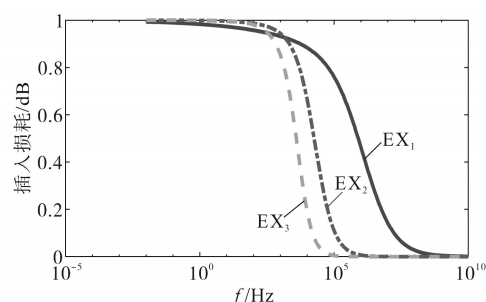


图14 不同阶次分数阶切比雪夫抗干扰滤波器插入损耗

Fig.14 Insertion loss of fractional-order Chebyshev

anti-interference filters with different order

由图14可知,随着阶次的升高,分数阶滤波器频率特性范围越大。采用分数阶切比雪夫硬件抗干扰方法,可以提高SF₆气体密度继电器采用的硬件裕度,即选择适当的分数阶阶次来实现多种数据感知装置的硬件抗干扰。

对于表3所示 α_2 三种阶次0.2,0.5,0.8的分数阶电容 C_{a2} ,其电容值可以通过4阶整数阶电容、电阻组成的电路进行逼近实现,如图15所示。

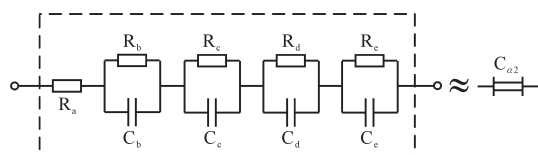


图15 分数阶切比雪夫抗干扰滤波器中分数阶电容逼近等效电路

Fig.15 Fractional capacitor approximation equivalent circuit for

fractional-order Chebyshev anti-interference filters

4 现场试验验证

基于分数阶滤波系统的LoRa新型抗干扰远传式SF₆密度继电器样机现场安装如图16所示。为了测试其供电电源抗干扰及硬件抗干扰两方面的可靠性,将样机分别安装于河北南部电网某500 kV变电站的220 kV,500 kV两种电压等级SF₆组合电器设备上,并与相同环境下传统的SF₆密度继电器进行对比。



图16 新型抗干扰远传式SF₆密度继电器现场样机

Fig.16 Field prototype of SF₆ density relay with new anti-interference and remote transmission

新型抗干扰远传式SF₆密度继电器与传统SF₆密度继电器在220 kV及500 kV电压等级的组合电器设备上供电电源抗干扰对比情况分别如图17、图18所示。其中,两种电压等级中新型抗干扰远传式SF₆密度继电器的分数阶噪声滤波器参数如表4所示。

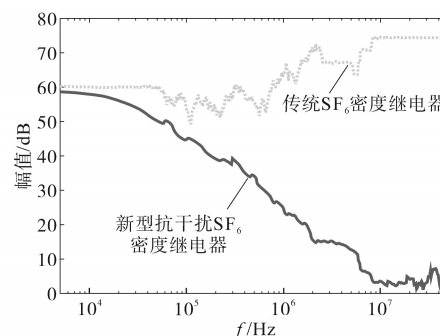


图17 220 kV组合电器供电电源抗干扰对比

Fig.17 Anti-interference comparison of power supply for 220 kV gas-insulated metal-enclosed switchgear

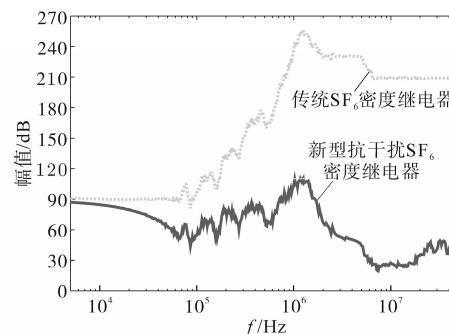


图18 500 kV组合电器供电电源抗干扰对比

Fig.18 Anti-interference comparison of power supply for 500 kV gas-insulated metal-enclosed switchgear

表4 两种电压等级中的分数阶噪声滤波器参数

Tab.4 Parameters of fractional-order noise filter in two types of voltage levels

	α_1	α_2	β_1	β_2
220 kV	0.2	0.25	0.6	0.65
500 kV	0.4	0.45	1.2	1.25

由图17可以明显看出,采用分数阶噪声滤波器供电电源抗干扰的SF₆密度继电器可以在高频

范围上有效抑制电网通过供电电源耦合进入的干扰。而传统SF₆密度继电器随着干扰频率的增加,供电电源抗干扰能力有所下降,无法有效抑制耦合进入的干扰。对于图18所示500 kV电压等级的组合电器两种SF₆密度继电器供电电源抗干扰对比情况,采用分数阶噪声滤波器的SF₆密度继电器将耦合进入的干扰信号幅值抑制在30~60 dB,而传统SF₆密度继电器无法有效抑制干扰信号,同时随着频率的增加,干扰信号幅值高达120 dB,约为新型抗干扰滤波器的4倍。

新型抗干扰远传式SF₆密度继电器与传统SF₆密度继电器在220 kV及500 kV电压等级的组合电器设备上硬件抗干扰对比情况分别如图19、图20所示。其中,两种电压等级中新型抗干扰远传式SF₆密度继电器的分数阶切比雪夫滤波器参数如表5所示。

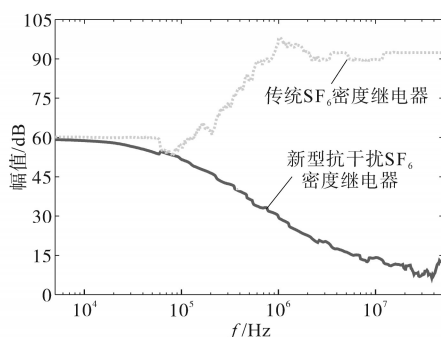


图19 220 kV组合电器硬件抗干扰对比

Fig.19 Hardware anti-interference comparison of 220 kV gas-insulated metal-enclosed switchgear

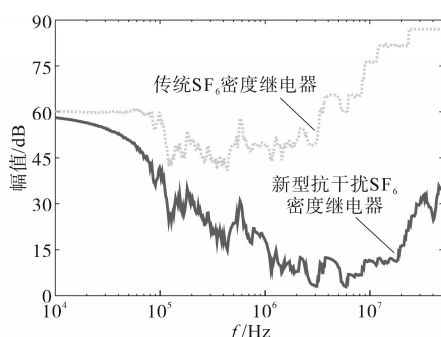


图20 500 kV组合电器硬件抗干扰对比

Fig.20 Hardware anti-interference comparison of 500 kV gas-insulated metal-enclosed switchgear

由图19可以明显看出,采用分数阶切比雪夫滤波器硬件抗干扰的SF₆密度继电器可以有效抑制共模、差模干扰,使得接入MCU核心板的SF₆气体压力或温度等数据采集传感器信号更加准确。对于图20所示500 kV电压等级的组合电器两种SF₆密度继电器硬件抗干扰对比情况,两种SF₆密

表5 两种电压等级中的分数阶切比雪夫滤波器参数

Tab.5 Parameters of fractional-order Chebyshev filter in two types of voltage levels

参数	电压等级/kV	
	220	500
α_1	0.8	1.0
α_2	0.5	0.8
$C_1/\mu\text{F}$	0.159	0.159
$R_4, R_5, R_6/\Omega$	1 000	1 000
$C_2/\mu\text{F}$	12.6	0.915
$R_1/\text{k}\Omega$	12.147	3.001
R_2/Ω	1 702.5	2 150.1
R_3/Ω	713.5	710.7

度继电器均可以在 $10^5 \sim 10^7$ Hz频带范围内对硬件干扰进行抑制。但通过试验对比可以发现,新型抗干扰SF₆密度继电器的抑制效果更加明显。同时随着频率的增加,传统SF₆密度继电器无法持续对硬件干扰进行抑制,虽然此时新型抗干扰SF₆密度继电器的抑制作用有些减弱,但要比同频带的传统SF₆密度继电器抑制效果好。高频带时新型SF₆密度继电器抑制效果约为传统密度继电器的3倍。

5 结论

本文基于分数阶滤波系统的新型抗干扰SF₆密度继电器,解决了传统SF₆密度继电器在供电电源抗干扰和硬件抗干扰两方面问题,提高了SF₆密度继电器在复杂电磁环境下的抗干扰性,提升了高压电器设备信息传输的可靠性。

参考文献

- [1] 王润华. SF₆气体监测系统在GIS组合电器中的应用[J]. 上海电力, 2006, 19(5): 536-538.
Wang Runhua. Application of SF₆ gas monitoring system in GIS combination electric appliance[J]. Shanghai Electric Power, 2006, 19(5): 536-538.
- [2] 习超群,邱曼曼,罗立波,等. 电接点密度继电器存在的主要问题及改进措施[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 197-202.
Xi Chaoqun, Qiu Manman, Luo Libo, et al. Main problems and improvement measures of electric contact density relay[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 192-202.
- [3] 周启义,高明贵,贾凤鸣,等. 一种无油抗振型SF₆气体密度继电器的研制[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 154-158.
Zhou Qiyi, Gao Minggui, Jia Fengming, et al. Development of an oil free vibration resistance type SF₆ gas density monitor[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 154-158.
- [4] 宋杲,李炜,宋竹生,等. 国网公司系统组合电器运行情况分析[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 78-82.

- Song Gao, Li Wei, Song Zhusheng, *et al.* Operation condition analysis for GIS in state grid corporation of China[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 78-82.
- [5] 董修峰. SF₆气体密度继电器的校验[J]. 东北电力技术, 2010(7): 43-45.
- Dong Xiufeng. SF₆ calibration of gas density relay[J]. North-east Electric Power Technology, 2010(7): 43-45.
- [6] 冯印富. SF₆密度表和密度继电器的结构及工作原理[J]. 农村电工, 2011, 19(3): 31-32.
- Feng Yinfu. Structure and working principle of SF₆ density meter and density relay[J]. Rural Electrician, 2011, 19(3): 31-32.
- [7] 孙银山, 尹军华, 寇新民, 等. SF₆密度继电器RS-485通信终端电阻匹配方法研究[J]. 电气自动化, 2015, 37(1): 46-48.
- Sun Yinshan, Yin Junhua, Kou Xinmin, *et al.* Research on the resistance matching method of RS-485 communication terminal of SF₆ density relay[J]. Electrical Automation, 2015, 37(1): 46-48.
- [8] 路永玲, 刘洋, 胡成博, 等. 基于LoRa的架空线路物联网感知技术研究[J]. 电气应用, 2019, 38(7): 68-72.
- Lu Yongling, Liu Yang, Hu Chengbo, *et al.* LoRa-based communication technology for overhead line internet of things[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(7): 68-72.
- [9] Haubro M, Orfanidis C, Oikonomou G. TSCH-over-LoRa: long range and reliable IPv6 multi-hop networks for the Internet of things[J]. Internet Technology Letters, 2020, 3(4): e165.
- [10] 陈金健. LoRa移动物联网基站无线覆盖的研究[J]. 科技与创新, 2018(14): 87-88.
- Chen Jinjian. Research on wireless coverage of LoRa mobile Internet of things base station[J]. Science and Technology and Innovation, 2018(14): 87-88.
- [11] 王淑凤, 卢铁兵, 崔翔, 等. 电力系统电磁兼容分析方法及数学模型综述[J]. 电力情报, 1998, 9(4): 1-5.
- Wang Shufeng, Lu Tiebing, Cui Xiang, *et al.* Review of electromagnetic compatibility analysis method and mathematical model for power system[J]. Information on Electric Power, 1998, 9(4): 1-5.
- [12] Ashtiani C, Wright R, Hunt G. Ultracapacitors for automotive applications[J]. Journal of Power Sources, 2006, 154(2): 561-566.
- [13] Kötzt R, Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors[J]. Electrochimica Acta, 2000, 45(4): 2483-2498.
- [14] 王炎, 崔建涛, 刘忠. 基于分数阶巴特沃斯滤波器的新型超级电容器[J]. 电子元件与材料, 2017, 36(5): 30-36.
- Wang Yan, Cui Jiantao, Liu Zhong. New supercapacitor model of fractional order Butterworth filter[J]. Electronic Components and Materials, 2017, 36(5): 30-36.

收稿日期:2020-08-03

修改稿日期:2020-09-23

(上接第52页)

- Yu Hao, Qin Wenping, Wei Bin, *et al.* Economic dispatch of hybrid AC/DC microgrid considering prediction error[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3987-3996.
- [13] 邱海峰, 赵波, 林达, 等. 计及储能损耗和换流成本的交直流混合微网区域协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 29-37.
- Qiu Haifeng, Zhao Bo, Lin Da, *et al.* Regional coordinated dispatch in AC/DC hybrid microgrids considering energy storage loss and converter cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 29-37.
- [14] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.
- Wang Shouxiang, Chen Sijia, Xie Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.
- [15] 杨旭红, 尹聪聪. 基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J]. 电气传动, 2020, 50(5): 75-80.
- Yang Xuhong, Yin Congcong. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.
- [16] 金星, 邵珠超, 王盛慧. 一种基于差分进化和灰狼算法的混合优化算法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 266-269.
- Jin Xing, Shao Zhuchao, Wang Shenghui. A hybrid optimization algorithm based on differential evolution and grey wolf optimizer[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(16): 266-269.
- [17] 于德鳌, 李慧, 刘思嘉, 等. 基于改进萤火虫算法的含风电系统环境经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 84-92.
- Yu Deao, Li Hui, Liu Sijia, *et al.* Environmental economic dispatch of power system integrated with wind power based on an improved glowworm swarm optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 84-92.
- [18] 姚方, 王佳伟, 文福拴, 等. 计及碳税的含风电和储能的电力系统经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 37-46.
- Yao Fang, Wang Jiawei, Wen Fushuan, *et al.* Economic dispatch for a power system containing wind power and energy storage with Carbon tax considered[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 37-46.

收稿日期:2020-09-11

修改稿日期:2020-10-23

基于定位 d 轴谐波电压偏移的孤岛检测新方法

白洪山¹,王鲁杨¹,柏扬²,邱蕾霓³,丁丽青¹,黄河遥¹

(1.上海电力大学 电气工程学院,上海 200090;2.国网上海市电力公司,上海 200120;

3.国网四川省电力公司,四川 成都 610094)

摘要:针对传统谐波域电量变化的被动式孤岛检测法检测盲区大、灵敏度低的问题,提出一种基于定位 d 轴谐波电压偏移的孤岛检测新方法。首先,通过计算公共耦合点处谐波有功功率贡献量,选择来自光伏侧和系统侧方向的代表频次谐波;然后,利用滑动加窗傅里叶变换和Park变换,求取代表谐波频次 d 轴谐波电压偏移,并作为孤岛特征量,依此建立检测判据。若来自光伏侧和系统侧的特征量均超过检测阈值,则判定孤岛。另外,分析计算孤岛特征理论阈值,提高孤岛检测的准确性。设置极端工况下孤岛和并网的多种故障进行仿真验证。结果表明,该方法简单可靠,不仅可以区分孤岛和非孤岛故障,而且在强背景谐波场景下能实现快速、无盲区检测。

关键词:光伏并网发电系统;孤岛检测; d 轴谐波电压偏移;谐波有功功率贡献量

中图分类号:TM7 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22449

A New Islanding Detection Method Based on the Locating d -axis Harmonic Voltage Offset

BAI Hongshan¹, WANG Luyang¹, BAI Yang², QIU Leini³, DING Liqing¹, HUANG Heyao¹

(1. College of Electrical Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200120, China; 3. State Grid

Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610094, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the problems of large blind areas and low sensitivity of the traditional passive islanding detection method for power changes in the harmonic domain, a new method of islanding detection based on the locating d -axis harmonic voltage offset was proposed. First, the representative harmonics from the photovoltaic side and the system side were selected by calculating the contribution of harmonic active power at the point of common coupling (PCC). Then, the sliding windowed Fourier transform and Park transform were used to calculate the d -axis harmonic voltage offset of the harmonic frequency of the substitution table as the islanding characteristic quantity, and the detection criterion was established accordingly. If the parameters from the photovoltaic side and the system side both exceed the threshold, there is an island. In addition, the theoretical threshold of islanding was analyzed to improve the accuracy of detection. Various faults of islanding and grid connection under extreme conditions were set up for simulation verification. The results show that the method is simple and reliable, it not only distinguishes islanding and non-islanding faults, but also can achieve fast and no blind spot detection in strong background harmonic scenes.

Key words: photovoltaic grid-connected power system; islanding detection; d -axis harmonic voltage offset; harmonic active power contributions

随着化石能源紧缺、环境污染等问题日益严重,新能源开发和利用不断增加,分布式发电技术的研究具有重大意义。光伏发电作为太阳能的主要利用方式,其波动性和间歇性给电网运行、控制及保护等方面造成诸多困难,孤岛故障

就是其中之一。基于逆变器的光伏发电系统若发生非计划性孤岛故障而未能快速、准确检测切除,会对电能质量造成不良影响,损坏电网和用户设备,严重时可能威胁到电力检修人员的人身安全。由此引出了对孤岛检测多种方法的研究^[1-2]。

基金项目:上海绿色能源并网工程技术研究中心资助项目(13DZ2251900)

作者简介:白洪山(1995—),男,硕士研究生,Email:1422194551@qq.com

现有的孤岛检测方法主要分为通信式、主动式和被动式^[3]。通信式检测法通过传递开关状态信号进行判别,该类方法无检测盲区、可靠性高,但实现困难、成本高,不利于推广。主动式检测法是不断地向系统注入规律性扰动,当某项运行参数超过检测阈值时,则发生孤岛^[4]。该类方法检测盲区小、灵敏度高,但会污染电能质量。文献[5]通过注入低频正弦无功电流扰动,使公共耦合点(point of common coupling, PCC)处频率发生波动,但其没有考虑多逆变器并网运行时,扰动注入不同步导致孤岛误判的问题。文献[6]通过实时反馈负载阻抗角改变注入的电流频率扰动,虽然完全消除了检测盲区,但造成了严重电流畸变问题。被动式检测法是通过实时监测PCC点处电量变化来判定孤岛^[7]。该类方法不影响系统电能质量和稳定性,但存在较大的局限性,如文献[8]以电压、频率作为特征量建立深度学习模型,虽然减小了检测盲区,但实际应用中很难获得大量的训练数据集,导致检测可靠性低,算法复杂而导致时效性差。

基于工频域的被动式孤岛检测法难以进一步突破,目前已有文献针对谐波域电量变化提出新的检测方法。文献[9]分析光伏电站高低次谐波电流输出特性,提出光伏电站动态谐波域模型,为本文建立光伏并网发电系统谐波电路模型提供基础;文献[10]提出以谐波电压为主、基波频率为辅的孤岛特征量,但其在强背景谐波场景下,存在检测盲区;文献[11]通过构建谐波阻抗特征函数作为孤岛特征量,利用BP神经网络实现检测,但其代表频次谐波选取不合理,检测准确性下降;文献[12]利用PCC点处特定次谐波阻抗 d, q 轴分量变化来判定孤岛,但并没有针对谐波信号门檻值的设定进行理论分析。

综上所述,实时监测谐波域本地电量的变化可实现被动式无盲区孤岛检测,但需要对谐波代表频次的选取、谐波特征量阈值的整定以及强背景谐波环境下检测可靠性的要求进一步研究。本文提出基于定位 d 轴谐波电压偏移的孤岛检测法,相较于目前已有的主动式检测法,未向并网系统注入扰动,对电能质量无污染,并且其独立作用于逆变器,多分布式电源并网运行时,检测可靠性高;与其他被动式检测法相比,该方法算法简单,响应速度快,特别针对在强背景谐波场景下,可实现孤岛故障的无盲区检测。

1 基于谐波域的孤岛检测分析

光伏发电系统正常并网运行时,由于大容量电网系统的等效阻抗非常小,与本地负荷并联,使得PCC点处的等效阻抗很小,孤岛故障发生后,PCC点处等效阻抗等于本地负荷阻抗。孤岛发生前后,PCC点处等效谐波阻抗的变化引起谐波电压波动,可据此判定孤岛。

传统基于谐波域电量变化的孤岛检测法忽略来自电网侧背景谐波,近似认为由光伏侧提供主要的谐波电流。光伏并网发电系统谐波电路如图1所示。

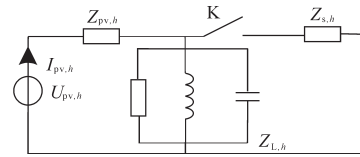


图1 光伏并网发电系统谐波电路图

Fig.1 Harmonic circuit of photovoltaic grid-connected power system

在孤岛发生后,即并网开关K断开,逆变器输出的谐波电流未发生突变,则PCC点处的 h 次谐波电压变化为

$$|U'_{pcc,h} - U_{pcc,h}| = |I_{pv,h} \cdot (Z_{L,h} - \frac{Z_{s,h} \cdot Z_{L,h}}{Z_{s,h} + Z_{L,h}})| \quad (1)$$

式中: $U_{pcc,h}$, $U'_{pcc,h}$ 分别为孤岛发生前、后PCC点处谐波电压; $I_{pv,h}$ 为逆变器输出谐波电流; $Z_{L,h}$ 为负荷等效谐波阻抗; $Z_{s,h}$ 为电网等效谐波阻抗。

基于谐波域电量变化的被动式孤岛检测法采用功率失配区间坐标来描述检测盲区。

孤岛发生前,负荷谐波有功功率 $P_{L,h}$ 为

$$P_{L,h} = U_{pcc,h}^2 / R \quad (2)$$

孤岛发生后,若光伏发电系统工作在恒功率模式下,逆变器输出谐波有功功率 $P_{pv,h}$ 保持不变,则PCC点处谐波电压有效值为

$$U'_{pcc,h} = \sqrt{P_{pv,h} \cdot R} \quad (3)$$

由式(2)~式(3)联立可得并网状态下功率不匹配表达式为

$$\frac{\Delta P_h}{P_{pv,h}} = \frac{P_{L,h} - P_{pv,h}}{P_{pv,h}} \frac{U_{pcc,h}^2}{U'^2_{pcc,h}} - 1 \quad (4)$$

相较于传统电压判据,当负荷功率和光伏发电系统输出功率完全匹配时,负载品质因数 Q_L 为1,孤岛处于极端状态,PCC点处电压和频率几乎保持不变,但由于谐波阻抗的变化,导致PCC点处谐波电压波动,故基于谐波电压变化的检测方法盲区更小,但该方法仍然存在较大的检测盲

区,其原因如下:

1)大容量非线性负荷及电力电子设备投入电网系统,造成系统侧波形畸变严重,使得PCC点处谐波电压增加,而造成孤岛误判;

2)针对实际应用中的三相系统,在发生单相断路、两相断路情况下,仅用某一相的谐波电压变化建立孤岛判据,孤岛保护装置无法快速准确动作,造成孤岛漏检;

3)正常并网运行时,由太阳能的间歇性和波动性使光伏系统内部产生谐波电流源,造成PCC点处谐波电压波动,导致孤岛保护误动作。

针对上述问题,提出基于定位*d*轴谐波电压偏移的孤岛检测法。根据谐波有功功率贡献量定位原则,选取来自光伏侧和系统侧的代表频次谐波,并将2个方向代表谐波频次*d*轴谐波电压偏移作为孤岛特征量,建立检测判据,有效地解决了检测盲区大、检测灵敏度低的问题。

2 基于定位*d*轴谐波电压偏移的孤岛检测原理及实现

2.1 基于定位*d*轴谐波电压偏移的孤岛检测

在并网系统中,光伏发电系统与电网通过PCC点进行能量交换。通过采集PCC点处电压、各支路电流进行计算,分析光伏侧产生的谐波或电网中含有的背景谐波对并网系统的影响,进一步划分各次谐波责任大小^[13]。

选择代表频次谐波时,一般在PCC点处将光伏并网系统谐波等效电路分为光伏侧和系统侧,如图2a所示。利用诺顿等效原理,将两侧等效为谐波电流源和谐波阻抗的并联,如图2b所示。图中, $I_{pv,h}$ 和 $I_{s,h}$ 分别为光伏侧和系统侧谐波电流; $Z_{eq,h}$ 为PCC点处等效谐波阻抗; $I_{pcc,h}$ 和 $U_{pcc,h}$ 分别

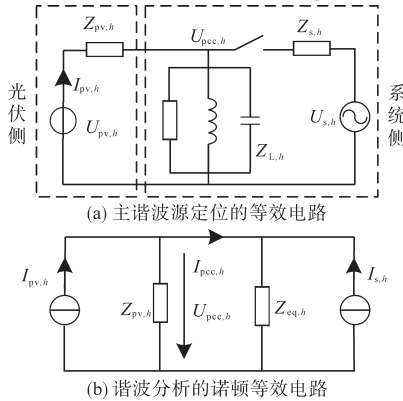


图2 光伏并网发电系统谐波等效模型
Fig.2 Harmonic equivalent model of PV grid-connected power system

为PCC点处谐波电流和谐波电压。

光伏并网系统在正常运行和孤岛故障情况下,PCC点处等效谐波阻抗 $Z_{eq,h}$, $Z'_{eq,h}$ 分别为

$$\begin{cases} Z_{eq,h} = Z_{s,h} \cdot Z_{L,h} / (Z_{s,h} + Z_{L,h}) \\ Z'_{eq,h} = Z_{L,h} \end{cases} \quad (5)$$

其中, h 次谐波阻抗由基波阻抗计算可得:

$$\begin{cases} Z_{L,h} = R / jh\omega L // -j \frac{1}{h\omega C} \\ Z_{s,h} = jhX_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: R, L, C 为本地负荷; X_s 为系统基波感抗; ω 为PCC点处电压的角频率。

根据叠加定理,将图2b分解为单个谐波源作用下的诺顿等效电路,如图3所示。

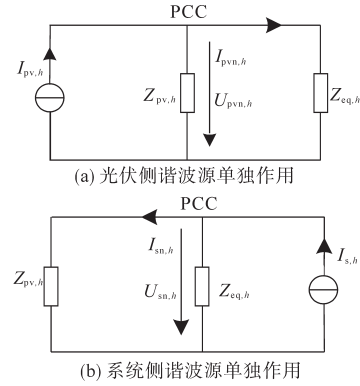


图3 分解后的诺顿等效电路

Fig.3 Decomposed Norton equivalent circuit

计算来自光伏侧和系统侧的 h 次谐波源单独作用时,PCC点处谐波电流贡献量分别为

$$\begin{cases} I_{pvn,h} = \frac{Z_{pv,h} \cdot I_{pv,h}}{Z_{pv,h} + Z_{eq,h}} = \frac{Z_{pv,h}}{Z_{pv,h} + Z_{eq,h}} \cdot \left(\frac{U_{pcc,h}}{Z_{pv,h}} + I_{pcc,h} \right) \\ I_{psn,h} = \frac{Z_{eq,h} \cdot I_{s,h}}{Z_{pv,h} + Z_{eq,h}} = \frac{Z_{eq,h}}{Z_{pv,h} + Z_{eq,h}} \cdot \left(\frac{U_{pcc,h}}{Z_{s,h}} - I_{pcc,h} \right) \end{cases} \quad (7)$$

因此,在正常并网与孤岛情况下,光伏侧代表频次(h_1 次)谐波源在PCC点处产生的谐波电压 $U_{pvn,h1}$, $U'_{pvn,h1}$ 分别为

$$\begin{cases} U_{pvn,h1} = \frac{Z_{pv,h1} \cdot Z_{eq,h1}}{Z_{pv,h1} + Z_{eq,h1}} \left(\frac{U_{pcc,h1}}{Z_{pv,h1}} + I_{pcc,h1} \right) \\ U'_{pvn,h1} = \frac{Z_{pv,h1} \cdot Z'_{eq,h1}}{Z_{pv,h1} + Z'_{eq,h1}} \left(\frac{U_{pcc,h1}}{Z_{pv,h1}} + I_{pcc,h1} \right) \end{cases} \quad (8)$$

同理,在正常并网和孤岛故障情况下,系统侧代表频次(h_2 次)谐波源在PCC点处产生的谐波电压 $U_{psn,h2}$, $U'_{psn,h2}$ 分别为

$$\begin{cases} U_{psn,h2} = \frac{Z_{pv,h2} \cdot Z_{eq,h2}}{Z_{pv,h2} + Z_{eq,h2}} \left(\frac{U_{pcc,h2}}{Z_{s,h2}} - I_{pcc,h2} \right) \\ U'_{psn,h2} \approx 0 \end{cases} \quad (9)$$

针对三相系统不同断路故障类型而形成的孤岛,利用Park变换计算PCC点处三相谐波电压贡献量d轴分量。再根据下式:

$$U_{d,hi}\% = \frac{|U'_{d,hi} - U_{d,hi}|}{|U_{d,hi}|} \times 100\% \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

可得 h_i 次d轴谐波电压偏移量,并将其作为孤岛特征。

综上所述,孤岛发生前后,光伏侧和系统侧代表频次谐波作用下的PCC点处d轴谐波电压发生偏移。可对代表频次(h_1, h_2)谐波电压d轴分量进行监测,并选择适当的检测阈值,当两个方向的孤岛特征量均超过阈值 $K_{d,hi}$ 时,即可判定为孤岛故障。整定规则如下:

$$\begin{cases} \bigcap_{i=1,2} (U_{d,hi}\% \geq K_{d,hi}) & \text{孤岛故障} \\ \bigcap_{i=1,2} (U_{d,hi}\% < K_{d,hi}) & \text{正常并网} \\ \text{其它} & \text{警告提示} \end{cases} \quad (11)$$

2.2 定位代表频次谐波

综合考虑来自光伏侧和系统侧方向谐波电压贡献量和谐波电流贡献量的影响,本文采用谐波有功功率贡献量来选择主谐波源代表频次,提高孤岛检测准确性。

根据式(7)~式(9),计算PCC点处来自光伏侧和系统侧代表频次谐波源单独作用时,谐波有功功率贡献量 $P_{pvn,h}, P_{sn,h}$ 如下式:

$$\begin{cases} P_{pvn,h} = \operatorname{Re}(U_{pvn,h} \cdot I_{pvn,h}^*) \\ = \frac{|U_{pcc,h} + I_{pcc,h} \cdot Z_{pv,h}|^2}{|Z_{pv,h} + Z_{eq,h}|^2} \cdot |Z_{eq,h}| \cos \theta_1 \\ P_{sn,h} = \operatorname{Re}(U_{sn,h} \cdot I_{sn,h}^*) \\ = \frac{|U_{pcc,h} - I_{pcc,h} \cdot Z_{eq,h}|^2}{|Z_{pv,h} + Z_{eq,h}|^2} \cdot |Z_{pv,h}| \cos \theta_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: θ_1, θ_2 分别为 $Z_{eq,h}, Z_{pv,h}$ 的相角; $I_{pvn,h}^*, I_{sn,h}^*$ 分别为来自光伏侧和系统侧谐波电流贡献量 $I_{pvn,h}, I_{sn,h}$ 的共轭复数。

通过比较两个方向的谐波源单独作用下在PCC点处有功功率贡献量的大小,判断主谐波源的位置并分类,判据如下:

1) 当 $\max(P_{pvn,h1,ki}, P_{sn,h1,ki}) = P_{pvn,h1,ki}$ 时,对于 $h_{1,ki}$ 次谐波,说明光伏侧对PCC点处影响更大, $h_{1,ki}$ 次主谐波源位于光伏侧;

2) 当 $\max(P_{pvn,h2,ki}, P_{sn,h2,ki}) = P_{sn,h2,ki}$ 时,对于 $h_{2,ki}$ 次谐波,说明系统侧对PCC点处影响更大, $h_{2,ki}$ 次主谐波源位于系统侧;

3) 当 $P_{pvn,h} = P_{sn,h}$ 时,说明两侧谐波对PCC处的影响相等,为简化算法,将其划分至光伏侧主要责任。

由于实际应用中变压器的接线方式,3次谐波可能无法流通至孤岛保护装置监测点,并且高次谐波受容性负载的影响大,难以检测。故根据谐波有功功率贡献量判据,对5~19次谐波进行责任划分,设置光伏侧谐波代表频次为 h_1 ,系统侧谐波代表频次为 h_2 。

代表谐波频次选取规则如下式:

$$h_i = \min \{h_{i,1}, h_{i,2}, \dots, h_{i,ki}\} \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

其中, $ki = 1, 2, 3, \dots, 8$,且 $k1+k2=8$ 。

2.3 孤岛特征理论阈值计算方法

基于谐波域电量变化的孤岛检测法存在阈值难以整定的问题,本文提供一种求取d轴谐波电压偏移理论阈值 $K_{d,h}$ 的方法。由式(5)、式(10)可得孤岛前后d轴谐波电压偏差为

$$K_{d,h} = K_m \cdot \frac{|Z_{L,h} - Z_{s,h} // Z_{L,h}|}{|Z_{s,h} // Z_{L,h}|} \times 100\% \quad (14)$$

为了防止系统滤波后造成的孤岛误判,设置谐波整定裕度 K_m ,取值为[0.9, 1.1]。

设置极端工况下,考虑到孤岛故障后所能形成最大负荷的孤岛运行状态,以光伏最大出力近似代替系统最大负荷容量。由此可得:

$$\begin{cases} R = \omega L = \frac{1}{\omega C} \\ R = \frac{U_N^2}{S_L} \approx \frac{U_N^2}{S_{pv,max}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: U_N 为电网额定电压; S_L 为负荷容量; $S_{pv,max}$ 为光伏出力最大负荷容量。

由于电网系统等效阻抗中电阻远小于感抗,可忽略其电阻。而在最小运行方式下,系统短路阻抗最大,导致孤岛前后d轴谐波电压偏移量最小,孤岛故障最难识别,故系统感抗由短路阻抗近似代替,由此可得:

$$Z_s = jX_s \approx j \frac{U_N^2}{S_{k,min}} \quad (16)$$

式中: $S_{k,min}$ 为最小运行方式下的短路容量。

根据式(6)、式(15)、式(16),计算 h_1, h_2 次负荷谐波阻抗与电网等效谐波阻抗,代入式(14)计算d轴谐波电压偏移理论阈值。

实际应用中,通过采集系统电压和电流参数,实时计算并调整d轴谐波电压偏移阈值,结合谐波有功功率贡献量定位原则,可有效防止因并

网系统谐波治理造成的孤岛漏检。

2.4 实现流程

定位d轴谐波电压偏移的孤岛检测法实现过程主要步骤如下:

1)实时采集三相光伏并网发电系统PCC点处电压、逆变器输出电流、电网系统输出电流,采用滑动加窗傅里叶变换同步计算5~19次谐波电压、谐波电流的幅值和相位。

2)根据式(12)计算PCC点处来自光伏侧、系统侧各次谐波有功功率贡献量。

3)根据谐波有功功率贡献量对各次谐波进行责任划分;根据式(13)选择光伏侧谐波代表频次为 h_1 ,系统侧谐波代表频次为 h_2 。

4)根据式(14)计算d轴谐波电压偏移理论阈值 $K_{d,h1}, K_{d,h2}$ 。

5)根据式(8)、式(9)计算PCC点处时窗 T 前后的 h_1, h_2 次谐波电压贡献量 $U_{pv,h1}(T), U_{pv,h1}(T+1), U_{sn,h2}(T), U_{sn,h2}(T+1)$ 。

6)对PCC点处 h_1, h_2 次三相谐波电压贡献量Park变换,提取d轴分量;根据式(10)计算时窗 T 前后d轴谐波电压偏移 $U_{d,h1}\%, U_{d,h2}\%$ 。

7)将 $U_{d,h1}\%, U_{d,h2}\%$ 与对应的理论阈值对比。若二者均超出阈值,则判定为孤岛故障,并采取孤岛保护措施;若均不超出阈值,则为正常并网运行状态,返回步骤5),继续同步监测运行状态;若仅单项超出阈值则可判定为非孤岛故障,发出警告提示。孤岛判据的整定方法如式(11)。

2.5 检测盲区分析

由式(4)经过Park变换可得,系统工作在恒功率模式时,所提新方法的盲区边界公式如下:

$$\frac{U_{dh}^2}{U_{dh,max}'^2} - 1 \leq \frac{\Delta P_{dh}}{P_{pv,dh}} \leq \frac{U_{dh}^2}{U_{dh,mix}'^2} - 1 \quad (17)$$

其中, $[U_{dh,mix}', U_{dh,max}']$ 为孤岛发生后PCC点处 h 次d轴谐波电压的范围。

可以看出,所提新方法类似于谐波电压判据检测盲区,但在此基础上,进一步缩小检测盲区。一方面,系统侧强背景谐波和光伏发电间歇性的干扰下,两个方向的判据共同作用,防止孤岛保护误动;另一方面,实际应用中,三相并网系统采用d轴分量检测孤岛,防止在单相及两相断路情况下的孤岛漏检。另外,灵活设置孤岛特征阈值,在强背景谐波场景下,理论上可实现无盲区检测。

基于光伏电站接入电网测试规程^[4]中定义的极端工况进行孤岛检测仿真验证,即孤岛内功

率平衡,负荷在50 Hz附近谐振,负载品质因数为 1 ± 0.1 。若最恶劣工况下设置各种故障均能被准确识别是否处于孤岛状态,则表明该方法可实现无盲区检测。

3 仿真验证及分析

本文使用Matlab软件对所提方法进行仿真验证,三相光伏并网发电系统模型如图4所示,并设置孤岛极端工况参数如下:电网额定电压380 V,频率50 Hz,电网等效感抗 $X_s = j0.20 \Omega$,含0.8%的11次背景谐波,取 $K_m = 1.1$;光伏阵列输出电压500 V,逆变器输出线电压380 V,输出功率25 kW,光伏发电系统等效阻抗 $Z_{pv} = 0.15 + j1.22 \Omega$;本地负荷 Z_L 采用品质因数为1的RLC并联负载,且在工频处发生谐振,取 $R = 6 \Omega, L = 19.11 \text{ mH}, C = 530.79 \mu\text{F}$ 。

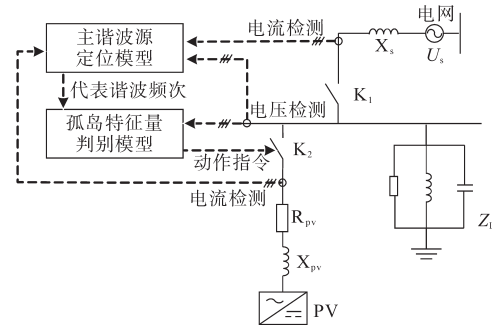


图4 三相光伏并网发电系统仿真模型

Fig.4 Simulation model of three-phase photovoltaic grid-connected power system

仿真时长1.2 s,采样频率4.8 kHz,采样时间0.2 s(0.7 s—0.9 s)。如图5所示,0.8 s时刻发生孤岛,PCC点处三相相电压的幅值和相位基本未发生改变,光伏输出功率与负荷吸收功率完全匹配,说明此时孤岛处于最严重的状态,但其d轴分量出现明显变化,且在相电压幅值附近周期性波动,故可作为孤岛检测特征量。

光伏并网发电系统PCC点处各次谐波有功功率贡献量的仿真结果如表1、表2所示。由表1可得,对于5次、7次、9次、15次、17次谐波, $P_{pv,h1} > P_{s,h1}$,故在PCC点处由光伏侧 h_1 次谐波承担责任更大;同理,由表2可得,对于11次、13次、19次谐波, $P_{pv,h2} < P_{s,h2}$,PCC点处由系统侧 h_2 次谐波承担责任更大。故选择光伏侧谐波代表频次为5,系统侧谐波代表频次为11。由此可见,运用谐波有功功率贡献量可以定量地划分各次谐波责任大小,更加准确地定位谐波主要来源。设置孤岛检测理论阈值取 $K_{d,5} = 122.37, K_{d,11} = 54.43$ 。

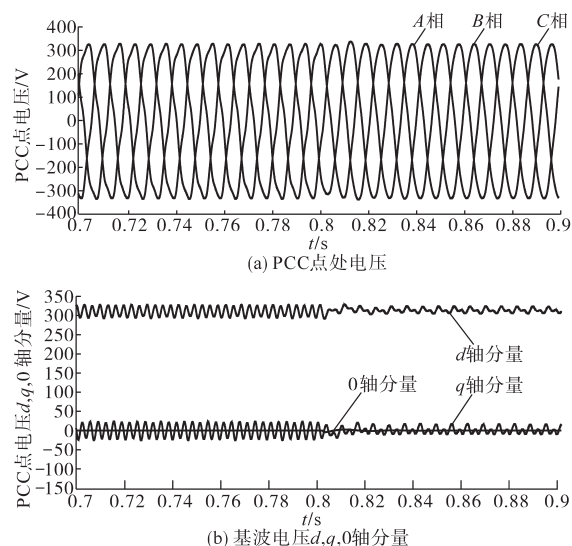


图5 光伏并网发电系统运行参数图

Fig.5 Operating parameters of photovoltaic grid-connected power system

表1 光伏侧谐波有功功率贡献量

Tab.1 Harmonic active power contribution of PV side

有功功率贡献量/W	谐波次数				
	5次	7次	9次	15次	17次
$P_{pv,h1}$	96.53	13.87	3.75	0.13	0.02
$P_{sn,h1}$	9.46	2.61	1.62	0.04	0.01

表2 系统侧谐波有功功率贡献量

Tab.2 Harmonic active power contribution of system side

有功功率贡献量/W	谐波次数		
	11次	13次	19次
$P_{pv,h2}$	0.79	0.25	—
$P_{sn,h2}$	1.42	0.65	0.005

设置极端情况下的孤岛故障(包括三相断路、两相断路和单相断路),对照设置并网运行(包括光伏波动、负荷突变和电网电压降落)不同故障下进行仿真以验证所提方法的有效性。

图6分别为极端工况下并网点处发生A相断路、AB两相断路而形成孤岛,光伏侧、系统侧代表频次谐波d轴谐波电压偏移波形变化。可以看出,正常并网运行时,5次、11次d轴谐波电压偏移基本为零;而0.8 s时刻,发生孤岛故障,针对并网系统不同断路类型,5次、11次谐波d轴谐波电压偏移量逐渐发生变化,均超过其对应检测阈值,判定为孤岛故障。同时极端工况所发生的3种断路故障下,该方法均在1个周期内成功检测出孤岛状态,对比已有被动式检测法,如文献[7],在最恶劣工况下,只需0.08 s检出并切除孤岛,远小于IEEE Std.1547规定的2 s标准。故在极端工况下,本文所提方法可有效防止孤岛漏检,且响

应时间非常短。

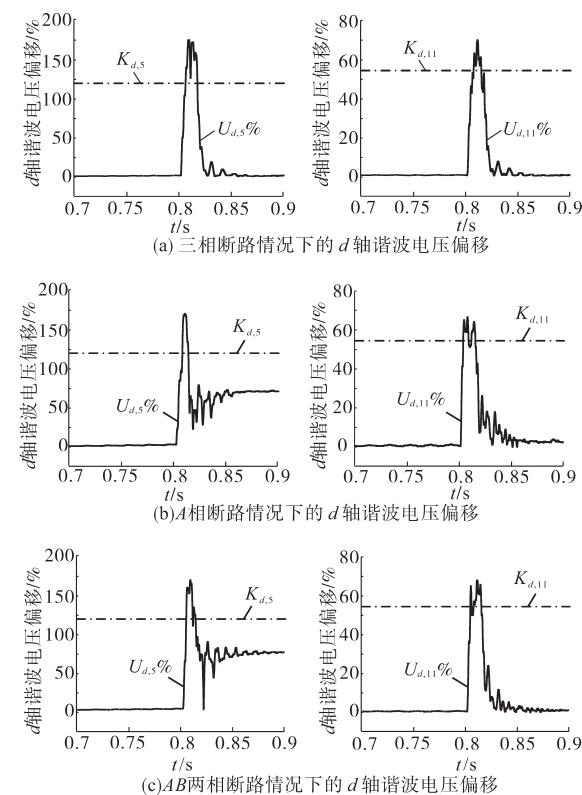


图6 孤岛故障仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms of islanding fault

由于太阳能发电的间歇性和波动性,光伏出力随环境变化而改变,造成逆变器输出谐波电流波动,从而影响PCC点处d轴谐波电压偏移量。光伏发电并网系统正常运行在极端工况下,设置0.8 s时刻,光伏模块的光照强度由1 000 kW/m²降至500 kW/m²,仿真结果如图7所示。可以看出,0.8 s时刻后,光伏侧5次谐波d轴谐波电压偏移量快速地超过了孤岛特征阈值,而相对应的系统侧11次孤岛特征量虽有变化,但明显较小。光伏并网发电系统继续运行,孤岛保护装置发出警告提示。故在极端工况下所提方法可有效防止光伏波动造成的孤岛误判。

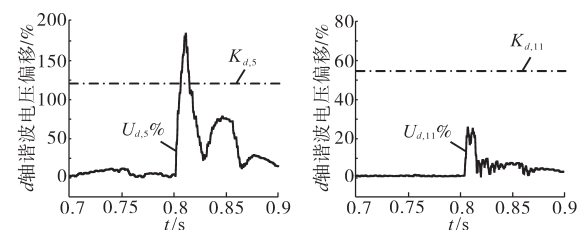


图7 光伏波动时d轴谐波电压偏移波形

Fig.7 Waveforms of d-axis harmonic voltage offset during photovoltaic fluctuation

电网电压跌落瞬间,光伏发电系统仍处于并网运行状态,光伏侧和系统侧有功功率出现偏

差,引起谐波电压增加,从而影响PCC点处 d 轴谐波电压偏移量。光伏发电并网系统正常运行在极端工况下,设置0.8 s时刻,电网电压跌落到额定值的80%。仿真结果如图8所示,11次谐波 d 轴谐波电压偏移量超过孤岛特征阈值,5次 d 轴谐波电压偏移量虽有变化,但波动较小且未超过阈值,光伏并网发电系统继续运行,孤岛保护装置发出警告提示。故在极端工况下所提方法可有效防止电网电压跌落造成的孤岛误判。

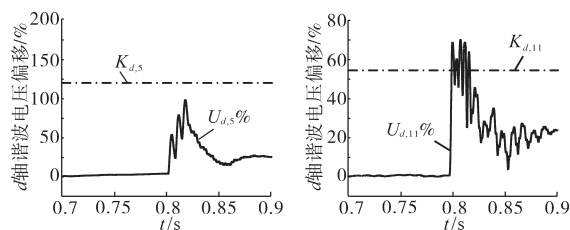


图8 电网电压跌落时 d 轴谐波电压偏移波形

Fig.8 Waveforms of d -axis harmonic voltage

offset during the grid voltage drop

PCC点处谐波等效阻抗由电网谐波等效阻抗和负荷谐波阻抗并联组成,且前者远小于后者,在正常并网运行的情况下,可近似认为PCC点谐波阻抗不变。光伏发电并网系统正常运行在极端工况下,设置0.8 s时刻,负荷有功功率由25 kW增至35 kW;1 s时刻,增加10 kvar感性无功功率;1.2 s时刻,增加5 kvar容性无功功率。仿真结果如图9所示,当负荷发生突变时,11次谐波 d 轴谐波电压偏移量超过孤岛特征阈值,而5次谐波 d 轴谐波电压偏移量低于检测阈值。光伏并网发电系统继续运行,孤岛保护装置发出警告提示。故在极端工况下所提方法可有效防止负荷突变造成的孤岛误判。

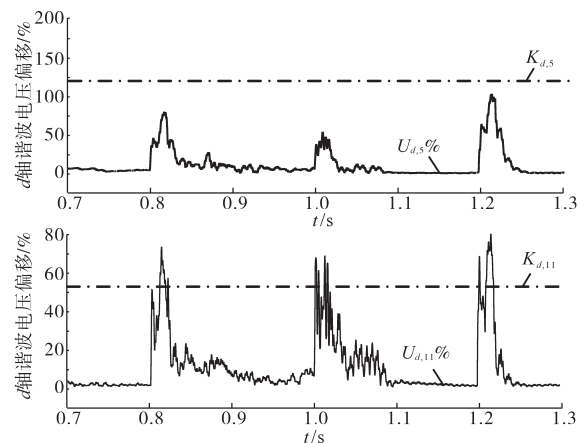


图9 负荷突变时 d 轴谐波电压偏移波形

Fig.9 Waveforms of d -axis harmonic voltage

offset during the load mutation

4 结论

本文提出一种基于定位 d 轴谐波电压偏移的孤岛检测方法,详细分析了其工作原理、检测盲区、定位谐波代表频次的选取和孤岛理论阈值的计算,通过在最恶劣工况下的仿真实验,验证了其有效性。结果表明,同时考虑光伏侧和系统侧孤岛发生前、后PCC点处谐波电压 d 轴分量变化情况,可以在孤岛极端情况下并网点发生单相及两相断路时仍准确识别孤岛,并在光伏波动、电网电压降落、负荷突变扰动下,发出警告提示。该方法与已有的检测法相比,可靠性高,响应速度快,对电能质量无污染,特别针对强背景谐波场景下,可实现孤岛故障的无盲区检测,具有良好的实用价值。

参考文献

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
Yang Xinfu, Su Jian, Lü Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 张兴,曹仁贤.太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M].北京:机械工业出版社,2009.
Zhang Xing, Cao Renxian. Photovoltaic grid-connected generation and its inverter control[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [3] 程启明,王映斐,程尹曼,等.分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(6):147-154.
Cheng Qiming, Wang Yingfei, Cheng Yinman, et al. Overview study on islanding detecting methods for distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 147-154.
- [4] 郑伟航,肖伸平,张晓虎.光伏系统的新型孤岛检测方法研究[J].电气传动,2020,50(1):95-99.
Zheng Weihang, Xiao Shenping, Zhang Xiaohu. Research on the new island detection method of photovoltaic system[J]. Electric Drive, 2020, 50(1): 95-99.
- [5] 孙皓,王鲁杨,柏扬,等.基于电流扰动-频率偏差的孤岛检测方法[J].电气传动,2018,48(3):75-80.
Sun Hao, Wang Luyang, Bai Yang, et al. Islanding detection method based on current disturbance and frequency deviation [J]. Electric Drive, 2018, 48(3): 75-80.
- [6] 唐忠廷,栗梅,刘尧,等.带负载阻抗角反馈的主动频移孤岛检测技术[J].电力系统自动化,2018,42(7):199-207.
Tang Zhongting, Su Mei, Liu Yao, et al. Active frequency drift islanding detection technology with feedback of load impedance angle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 199-207.

- [7] 刘新天,冯嘉骏,何耀,等. 基于闭环锁频控制的并网逆变器孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(22):116-123.
Liu Xintian, Feng Jiajun, He Yao, *et al.* Islanding detection method based on closed-loop frequency-locked control for grid-connected inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 116-123.
- [8] 尹超勇. 同步型分布式电源的被动式孤岛检测方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
Yin Chaoyong. Research on passive islanding detection method for synchronous distributed generation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [9] 谢宁,罗安,陈燕东,等. 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):10-17.
Xie Ning, Luo An, Chen Yandong, *et al.* Dynamic modeling and characteristic analysis on harmonics of photovoltaic power stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 10-17.
- [10] 陈永华,唐冠军,王森,等. 基于谐波电压与基波频率的被动式孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(14):200-206.
Chen Yonghua, Tang Guanjin, Wang Sen, *et al.* Passive islanding detection method based on harmonic voltage and fundamental frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 200-206.
- [11] 戴云霞,苏建徽,刘宁,等. 基于谐波阻抗特征函数的分布式发电孤岛识别方法研究[J]. 电工电能新技术,2015,34(12): 37-42.
Dai Yunxia, Su Jianhui, Liu Ning, *et al.* Research on islanding identification method for distributed generation based on harmonic impedance characteristic function[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(12): 37-42.
- [12] 高淑萍,李文浩,汪凯昌,等. 基于谐波阻抗 dq 分量的孤岛检测新方法[J]. 太阳能学报,2018,39(9):2387-2392.
Gao Shuping, Li Wenhao, Wang Kaichang, *et al.* A new islanding detection method based on harmonic impedance dq component[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(9): 2387-2392.
- [13] 艾永乐,郑建云. 基于谐波有功功率贡献量的主谐波源定位[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(7):16-21.
Ai Yongle, Zheng Jianyun. Localization of the main harmonic source based on the harmonic active power contributions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 16-21.
- [14] 张军军. Q/GDW618—2011. 光伏电站接入电网测试规程[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
Zhang Junjun. Q/GDW618—2011. Test procedure for photovoltaic power station connected to power grid[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- 收稿日期:2020-09-18
修改稿日期:2020-09-28
- ~~~~~
- (上接第 64 页)
- Technology and Engineering, 2019, 19(28): 172-178.
- [16] 黄悦华,邹子豪,张赞宁,等. 基于 FP-Growth 算法的配电网薄弱点分析研究[J]. 电测与仪表,2020,57(17):79-84,135.
Huang Y H, Zou Z H, Zhang Y N, *et al.* Analysis of weak points of distribution network based on FP-Growth algorithm[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(17): 79-84, 135.
- [17] 刘思怡,苏运,张焰. 基于 FP-Growth 算法的 10 kV 配电网分支线断线故障诊断与定位方法[J]. 电网技术,2019,43(12): 4575-4582.
Liu S Y, Su Y, Zhang Y. A 10 kV distribution network branch line disconnection fault diagnosis and location method based on FP-Growth algorithm[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4575-4582.
- [18] 黄知超,谢霞,王斌. 结合模糊综合评判与决策的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(7):65-69.
Huang Z C, Xie X, Wang B. Power system state estimation combined with fuzzy comprehensive evaluation and decision-making [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 65-69.
- [19] 李海英,李媛媛,宋建成. 基于模糊控制和 AHP 的矿井变频调速通风系统[J]. 电气传动,2012,42(1):17-21.
Li H Y, Li Y Y, Song J C. Mine frequency conversion speed regulation ventilation system based on fuzzy control and AHP[J]. Electric Drive, 2012, 42(1): 17-21.
- 收稿日期:2020-08-06
修改稿日期:2020-10-22