

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.04.014

基于改进 TS 模糊的直流电弧炉闪变抑制优化

朱明星^{1,2}, 许路遥¹, 高敏^{1,2}

(1. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230039;
2. 安徽大学绿色产业创新研究院, 安徽 合肥 230601)

摘要:为提高静止无功补偿器(static var compensator, SVC)应对直流电弧炉等冲击性负载的闪变抑制性能,文中在改进 Takagi-Sugeno(TS)模糊算法的基础上,提出一种 SVC 滚动预测控制方法。首先,建立直流电弧炉电气模型并仿真分析其无功特性;然后,针对经典 TS 模糊预测算法应用于波动负荷时出现的输出异常置 0 情况,提出一种范围自适应修正的改进方法,该方法能消除一类算法应用机理导致的异常值,从而提高 TS 模糊算法对波动负荷无功功率预测的可靠性和准确性;最后,基于模型训练时间约束,建立无功功率半周期滚动预测控制模型,提前 10 ms 预测无功功率,改善了 SVC 传统控制系统响应的滞后特性。仿真结果表明,相比于 SVC 传统控制方法,所提方法的平均闪变改善率提高了 54.17%,验证了所提方法对闪变现象的抑制效果提升显著。

关键词:Takagi-Sugeno(TS)模糊算法;直流电弧炉;静止无功补偿器(SVC);预测控制;异常值修正;闪变抑制
中图分类号:TM711 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-3203(2024)04-0136-11

0 引言

为达成“碳达峰、碳中和”目标,发展高效绿色电炉冶炼技术,淘汰落后产能、实现钢铁产业调整升级刻不容缓。电弧炉作为钢铁产业核心生产设备,在冶炼过程中,电弧的短路、断路和随机波动等行为会导致电弧电阻具有很强的随机性、非线性和冲击性,炉料的崩塌、钢液面的沸腾等也会进一步加剧上述特性,这种特性使得电弧炉生产中产生剧烈的无功波动,造成电压闪变并在电网中传播,对照明设备和其他闪变敏感负荷的安全稳定运行产生影响^[1-3]。因此,电弧炉装置必须设置动态无功补偿装置来抑制闪变,如静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止无功发生器(static var generator, SVG)等。从补偿效果来看,SVG 是优于 SVC 的,但在实际工程中,大容量 SVG 装置成熟应用案例较少,运行可靠性等还有待工程应用考验^[4]。而晶闸管控制电抗器(thyristor-controlled reactor, TCR)型 SVC 具有造价低廉、控制简单和可靠性高等优点,使其在大容量电弧炉治理中仍占有较大市场份额。

但 TCR 型 SVC 装置的闪变抑制性能与其响应延迟时间密切相关,TCR 采用晶闸管相控整流,最小触发延迟时间是供电频率的半个周期,50 Hz 工频下为 10 ms,在负载剧烈变化时难以实现无功的快速跟踪补偿^[5],因此采用 SVC 控制的直流电弧炉在接入公共连接点时常出现闪变超标的问题。工

程应用中应考虑一种延迟补偿技术的解决方案,以提高 SVC 在闪变抑制中的性能。

基于这一需求,有学者提出采用预测控制技术来弥补 SVC 在响应时间上的不足。目前,预测控制技术已在风电^[6-9]和光伏^[10-12]领域得到广泛应用,但在电弧炉尤其是直流电弧炉领域的相关研究较少。国内对电弧炉预测控制的研究多集中于电极调节领域以及炉渣、碳含量等冶炼流程领域^[13-15],通过电极稳定控制来实现用电设备本体的无功波动抑制,或是在工艺流程上提高生产质量;也有文献用混沌理论建模预测,但仅为弧压控制提供参考^[16],并没有用于具体的模型控制中。国外学者 Haidar Samet 针对预测控制技术发表了多篇研究成果^[17-20],采用了卷积神经网络、灰色预测算法、自回归滑动平均模型(autoressive moving average model, ARMA)、Takagi-Sugeno(TS)模糊等众多预测算法提高 SVC 补偿性能,但多用于风电领域,少数对电弧炉领域的研究也是针对交流电弧炉,且仅用简单电流源对交流电弧炉建模,没有涉及电弧炉的用电机理。

对直流电弧炉无功功率进行预测控制,是根据当前及历史无功数据来预测下一时刻实际需要的无功缺额。传统确定性线性时序预测法如 ARMA 等^[21-22]依赖大量历史数据,且要求数据具有良好的统计特性。但电弧炉实际运行数据受各种现实因素影响,在这些预测方法中往往难以将环境因素及人为因素等均考虑在内,使得记录数据具有波动性、模糊性以及非线性特质,这就限制了传统确定

收稿日期:2024-01-15;修回日期:2024-03-26

线性时序预测方法的应用。与之相比,模糊时间序列能较好地反映不精确数据的模糊关联本质,且是非线性模型,普适性高,因此得到广泛的研究和应用。

对经典 TS 模糊时序预测的研究现多集中于预测精度的提高上^[23-25],采用多种算法研究初始值的选取和模糊子空间的划分,但对该算法具体应用中的问题则少有研究。其中,在时间序列波动性较高的应用场景下,会出现输出值异常置 0 的情况,而电弧炉应用中突变的异常值将严重影响闪变抑制的效果,并且未发现有相关文献对该情况进行分析。

综上,文中首先基于直流电弧炉供电和控制系统,详述了直流电弧炉建模原理及无功控制特性;其次建立了 TS 模糊无功预测模型,研究应用中异常值的产生机理,提出一种异常值检测与修正方法,并与传统 SVC 控制系统结合,建立 SVC 半周期滚动预测控制模型;最后,通过仿真验证了所提方法对提高 SVC 闪变抑制效果的优越性。

1 直流电弧炉电气模型及无功特性

直流电弧炉负载模型的建立是研究和设计直流电弧炉控制系统的前提和基础。直流电弧炉电源系统一般由电炉变压器、整流器、直流电抗器、电极及直流电弧组成,如图 1 所示。其中整流器在直流电弧炉的电源系统中占有重要地位,是直流炉电源系统电能质量特性的重要组成部分。根据电网容量和对谐波的要求,整流器通常采用 12 脉波及以上的整流装置,整流相数越多,谐波畸变越小,但控制将愈加复杂。文中参考某钢铁公司直流电弧炉项目数据,将整流变压器二次绕组分别接成星形和三角形,将 2 个 6 脉波整流器经平波电抗器并联组成 12 脉波整流器。

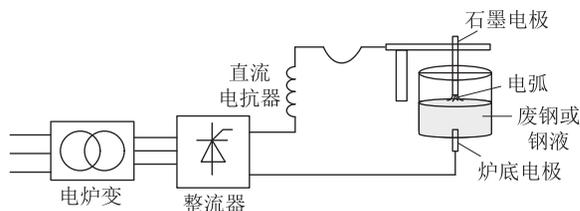


图 1 直流电弧炉供电系统

Fig.1 DC arc furnace power supply system

直流电弧炉造成的电压波动和闪变都是直流电弧变化的结果。大量研究结果^[26-27]表明,电弧长的变化呈现随机特性,钢液和炉渣的流动、电弧电离程度的变化、电极的颤动、在电磁力作用下电弧路径的变动、环境以及人为的控制等因素都会造成这种随机性。因此对直流电弧炉建模须综合上

述因素,研究能反应其工作流程的特性,将直流电弧炉用合理的数学模型抽象出来。基于电弧电阻非线性伏安特性建模是一种被广泛应用的方法,具体实施流程为采集直流电弧炉运行时的电弧电压与电弧电流,采用数学方法进行分析,将时变等效电阻作为电弧模型。为了更好地体现网侧电网电气特性,文中采集直流电弧炉网侧的有功、无功功率运行数据,根据供电模型,推导直流电弧电压电流关系,用等效时变非线性电阻来模拟电弧变化^[28]。6 脉波整流装置电压电流关系推导如下:

$$U_d = 2.34U_2 \cos \alpha = 1.35U_{2L} \cos \alpha \quad (1)$$

式中: U_d 为直流侧电压平均值; α 为三相桥式整流电路晶闸管触发角; U_2 、 U_{2L} 分别为整流变压器二次侧相电压和线电压的有效值。

整流变压器二次侧电流有效值 I_2 为:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} I_d^2 d(\omega t)} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d = 0.816 I_d \quad (2)$$

式中: I_d 为直流侧电流平均值。根据上述基本数量关系可知,通过交流侧电气量参数可以计算出直流侧电气量参数。

当已知交流侧电流时,可计算出 I_d 为:

$$I_d = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_2 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \times \frac{U_{N1}}{U_{N2}} I_1 \quad (3)$$

式中: I_1 为整流变一次侧电流有效值; U_{N1} 、 U_{N2} 分别为整流变一次侧和二次侧额定电压。12 脉波整流装置与 6 脉波整流装置电压电流关系只是倍数的差别。

根据能量守恒原理,直流电弧炉从电网侧汲取有功功率,除部分在电弧炉变压器、整流器和短网电路中消耗外,其余的有功功率均用于电弧加热,因此设直流电弧炉的电路效率为 η ,则可计算出直流电弧炉直流侧平均电压为:

$$U_d = \frac{P_d}{I_d} = \frac{P_1 \eta}{I_d} = \frac{3U_1 I_1 \cos \theta}{I_d} \eta \quad (4)$$

式中: P_d 为直流电弧炉直流侧功率; P_1 为直流电弧炉网侧运行的三相总有功功率; U_1 为直流炉整流变一次侧相电压有效值; $\cos \theta$ 为电炉变一次侧功率因数。直流电弧炉的等效回路如图 2 所示。

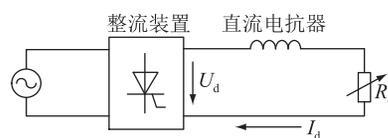


图 2 直流电弧炉等效回路示意

Fig.2 Schematic diagram of DC arc furnace equivalent circuit

则直流电弧炉直流侧电阻计算如下:

$$R_d = U_d / I_d \quad (5)$$

结合电炉设计资料和实测数据,经过计算得到,模拟的直流电弧炉系统恒流设定值为 95 kA,直流电弧阻值波动在 0.009 Ω 附近。

基于上述理论在仿真平台搭建直流电弧炉电气模型,设定恒流电流,将电弧时变电阻作为输入,仿真运行得到该模型的网侧仿真无功功率,与实际无功功率数据进行对比,结果如图 3 所示。可以看出,基于网侧有功功率推导的电弧时变电阻所建立模型的无功功率与实测结果趋势基本符合,均方根误差为 4.18,平均误差百分比为 1.56%,所建模型能够反映实际直流电弧炉无功波动情况。

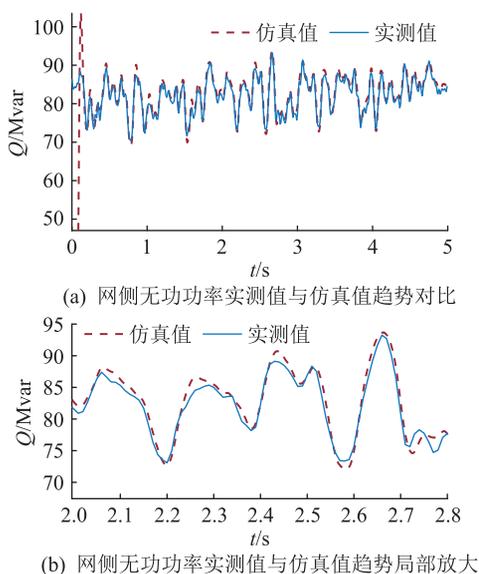


图3 无功功率实测值与仿真值趋势对比
Fig.3 Trend comparison between measured and simulated reactive power

直流电弧炉具有电流和电压 2 个控制系统,控制过程如图 4 所示, U_s 、 I_s 分别为操作设定电压、电流。直流电弧炉的工作点 A 可以在炉用变压器二次侧的电压最大值和额定电流最大值所形成的图 4 所示的区域内任意设定。当实际工作点偏离设定点时,可以通过 2 个控制系统对工况进行修正。直流电弧炉在实际冶炼中采用恒流控制,通过比例积分微分 (proportion integral differential, PID) 控制器改变可控硅触发角从而调节整流装置的直流输出电压,以达到保持直流电流恒定的目的。而弧压的调节是靠控制电极距钢液面的位置来完成的,其调节速度较慢,一般情况下,仅在 100 ms 内就可完成一次弧流调节,而弧压调节的一次调整周期却需要持续数百毫秒。实际控制中优先利用电流控制,电压控制只作为二次控制使用。

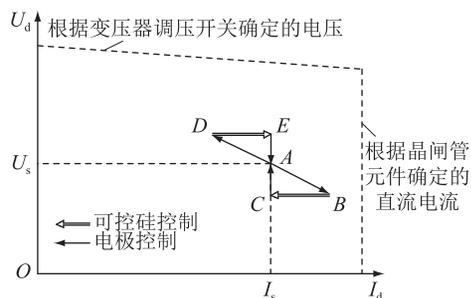


图4 直流电弧炉控制过程

Fig.4 DC arc furnace control process

电流控制系统对弧流的快速调整可以保持其在功率的稳定性,避免对电网的大功率冲击,但调节过程中晶闸管触发角的快速变化却会造成无功功率的剧烈波动。由于操作设定值的约束,无功功率波动具有一定的周期性,波动周期一般在 100 ~ 300 ms 范围内^[29],且能量具有惯性,因此无功变化具有一定的连续性,这为后续无功功率超短期预测控制提供了基础。

2 改进 TS 模糊预测模型

2.1 经典 TS 模糊预测模型

TS 模糊模型是由一组 IF-THEN 模糊规则来描述的非线性模型,每条规则代表一个子系统^[30]。对于离散系统模型,令 R_l 表示模糊系统的第 l 条规则,其一阶模糊模型典型的模糊条件句为:

$$R_l: \text{If } u_1(k) \text{ is } M_{l,1} \text{ and } \dots \text{ and } u_d(k) \text{ is } M_{l,d}$$

$$\text{Then } y(k) = p_{l,0} + \sum_{j=1}^d p_{l,j} u_j(k) \quad (6)$$

式中: k 为当前样本时刻; $u_j(k)$ 、 $y(k)$ 分别为 TS 模糊模型 k 时刻的输入和输出, $j = 1, 2, \dots, d$; $M_{l,j}$ 、 $p_{l,j}$ 分别为模糊集和后件参数。文中模糊集被设为三角隶属度函数:

$$M_{l,j} = \max \left(\min \left(\frac{u_j - a_{l,j}}{b_{l,j} - a_{l,j}}, \frac{c_{l,j} - u_j}{c_{l,j} - b_{l,j}} \right), 0 \right) \quad (7)$$

式中: $a_{l,j}$ 、 $b_{l,j}$ 、 $c_{l,j}$ 为模糊集的参数,在模糊表示中可以考虑多种隶属度函数,例如高斯隶属度函数、钟形隶属度函数等。现有的文献对隶属度函数的选择还未有一个统一的标准,一般根据具体算例进行选择。

整个 TS 模糊系统构建如下:

$$y(k) = f(\tilde{\mathbf{u}}(k)) = \sum_{l=1}^n \sum_{j=0}^m h_l p_{l,j} \tilde{\mathbf{u}}_j(k) \quad (8)$$

$$\tilde{\mathbf{u}}_j(k) = [\tilde{u}_0(k) \quad \tilde{u}_1(k) \quad \dots \quad \tilde{u}_d(k)]^T = [1 \quad u_1(k) \quad u_2(k) \quad \dots \quad u_d(k)]^T \quad (9)$$

式中: n 为模糊规则数; m 为模糊系统输入数目; h_l

为归一化隶属度函数,定义如式(10)所示。

$$\begin{cases} h_l = \frac{w_l}{\sum_{l=1}^n w_l} \\ w_l = \min(M_{l,j}) \end{cases} \quad (10)$$

2.2 异常值分析

首先要指出的是,关于隶属度函数的选择,如果隶属度函数选为高斯隶属度函数,理论上不会出现隶属度函数为 0 的情况,但一方面,受限于计算机的精度,计算结果显示为 0;另一方面,虽不会出现为 0 的情况,但如果输入值均偏离各个隶属度函数的中心,其误差也将随之增大。基于上述考量,文中选用了三角隶属度函数。

对波动性较高的时间序列,经典模糊预测模型会有输出直接置 0 的异常情况出现,这是因为在新的数据输入已建立的模型时,可能出现输入变量超出隶属函数变量区间的情况,从而导致计算出的每条规则的权重均置 0。相较于传统集合,模糊集之间的界限划分并不是非此即彼,而是以 $[0, 1]$ 区间的数值隶属于该集合,即元素在多大程度上符合该模糊集定义。由此在实际应用中出现了一个问题:模糊子集的建立是依托于历史训练数据的,而相应的模糊子空间,即三角隶属度函数的输入空间范围也是基于历史训练数据的,如果输入模型的新数据在历史训练数据范围之外,那么该数据对所有模糊集的隶属程度就可能会出现全为 0 的现象,极端情况下,前 d 个前提变量如果均出现所有模糊集隶属度为 0 的情况,就会导致模型输出为 0。由于无功功率具有惯性,在该种情况下,一方面,数据的内在关联性仍然保持;另一方面,数据超出模型输入范围,使得输出值出现异常。

针对这一缺陷,文中提出一种异常值范围修正的方法,如果检测到归一化的隶属度函数均为 0,便进入修正环节。该修正环节的作用就是在出现上述极端情况时,将对应数据进行偏移,使其出现在模糊集范围中,模型输出后再进行复位,具体流程如图 5 所示。

设每个前提变量 $u_i, u_j (i, j = 1, 2, \dots, d; i \leq j)$ 的隶属度函数范围区间为 $[N_i, M_i]$, 当出现归一化的隶属度函数均为 0 的情况,即 u_i, u_j 均偏离其各自模糊子空间时,计算每个前提变量与其相应模糊子空间的偏离程度 P_i , 以绝对值最大的偏离度 P_m 为基础,加入一个偏离基准数 P_b 进行反向偏离,同时考虑其最小偏离度不反向超过模糊子空间边值,使各前提变量居于其各自模糊子空间范围内,得出输出

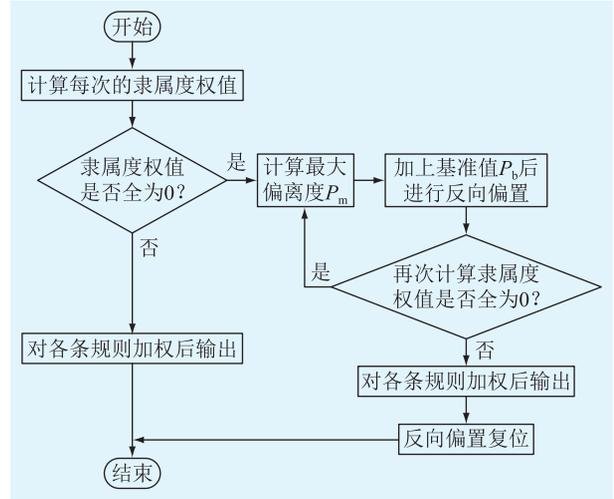


图 5 异常值检测与修正流程

Fig.5 Flow chart of outlier detection and correction

值后再进行复位。偏离基准值的选取以最大模糊子空间交叠范围为准:

$$P_b = a(\max(M_i) - \min(N_i)) \quad (11)$$

式中: $a \in [0, 0.1]$, 根据判断语句循环次数的增加, 该值应当逐渐降低, 以保证新的数据输入的所有前提变量均处于各自隶属度函数范围区间。

2.3 改进 TS 模糊预测方法

改进后的 TS 模糊时序预测模型建立方法如下: 根据初始设定的前提变量和参数, 以最小化性能指标的要求来确定后件参数。其中性能指标可根据实际系统要求选择经济指标或其他控制目标, 文中选用输出误差的均方根来衡量实际值与模型输出数据之间的差异。

已知一个 TS 模糊系统的输出 y 可以表示为:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^n M(p_{l,0} + p_{l,1}u_1 + \dots + p_{l,d}u_d)}{\sum_{l=1}^n M} \quad (12)$$

其中:

$$M = \min(M_{l,1}(u_1), \dots, M_{l,d}(u_d)) \quad (13)$$

当一系列输入输出数据 $u_{1,q}, u_{2,q}, \dots, u_{d,q} \rightarrow y_q (q = 1, 2, \dots, m)$ 已给出, 可根据线性最小二乘法获得后件参数 $p_{l,0}, p_{l,1}, \dots, p_{l,d} (l = 1, 2, \dots, n)$ 。TS 模糊模型的一大优点就是可以将成熟的线性理论应用于不成熟的非线性系统建模中。

令 $\mathbf{X}_{m \times n \times (d+1)}, \mathbf{Y}_{m \times 1}, \mathbf{P}_{n \times (d+1) \times 1}$ 分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [\mathbf{X}_0 & \mathbf{X}_1 & \dots & \mathbf{X}_d] \\ \mathbf{Y} = [y_1 & y_2 & \dots & y_m]^T \\ \mathbf{P} = \\ [p_{1,0} & \dots & p_{n,0} & p_{1,1} & \dots & p_{n,1} & \dots & p_{1,d} & \dots & p_{n,d}]^T \end{cases} \quad (14)$$

其中:

$$X_0 = \begin{bmatrix} \beta_{1,1} & \cdots & \beta_{n,1} \\ \vdots & & \vdots \\ \beta_{1,m} & \cdots & \beta_{n,m} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$X_j = \begin{bmatrix} u_{j,1}\beta_{1,1} & \cdots & u_{j,1}\beta_{n,1} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{j,m}\beta_{1,m} & \cdots & u_{j,m}\beta_{n,m} \end{bmatrix} \quad j = 1, 2, \dots, d \quad (16)$$

$$\beta_{l,j} = \frac{M_{l,1}(u_{1,j}) \wedge \cdots \wedge M_{l,d}(u_{d,j})}{\sum_{l=1}^n M_{l,1}(u_{1,j}) \wedge \cdots \wedge M_{l,d}(u_{d,j})} \quad (17)$$

则参数向量 P 可以通过式(18)计算:

$$P = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (18)$$

根据已知的前提变量和参数可以确定后件参数的数值,然而前提变量和参数仍须进行择优选择。此外,输入的所有变量并不总是出现在前提变量中,该问题涉及 2 个方面,一个是变量的选择,另一个是变量空间的划分,整体是一个组合问题。启发式搜索方法与寻优算法的结合是目前常采用的策略。此外,考虑到隶属度函数可能出现的输出异常置 0 情况,具体应用步骤如下:

假设建立一个 k 输入单输出的模糊系统。

步骤一:将变量 u_1 的取值范围划分为 N 个模糊子空间,其他变量 u_2, \dots, u_d 的取值范围不划分,这意味着只有 u_1 出现在推论的前提变量中。将这样组成的模型称为 1-1 模型。同样,如果 u_2 的取值范围被划分,其他变量 u_1, u_3, \dots, u_d 不被划分,将该模型称为 1-2 模型。这样就有了 d 个模型,每个模型都包含 N 个子空间。

步骤二:设置初始前提参数,采用最小二乘法计算模糊子系统后件参数,之后采用寻优算法在确定的后件参数基础上重新寻找能使性能指标最小的前提参数值,迭代数次直至满足搜索条件。文中采用 fmincon 函数进行寻优。在 d 个模型中采用性能指标最好的模型,并将其称为稳定状态。

步骤三:在前提变量中放入另一个变量,取变量 $u_i, u_j (i, j=1, 2, \dots, d; i \neq j)$ 的所有组合,将每个变量的取值范围划分到 N 个模糊子空间中,并将得到的模型称为 2- ij 模型。同样采用上述算法求解每个模型的最优前提参数和后件参数,并将稳定状态替换为当前性能指标最优的模型。

步骤四:继续在前提变量中加入变量,以此类推,重复步骤三。

步骤五:如果满足以下任一条件,则停止搜索。

(1) 稳定状态的性能指标小于预定值;

(2) 稳定状态的前提变量超过预先确定的数值。

此时,依据历史数据将得到一个性能指标最优的模糊模型。

步骤六:将得到的模型放入具体的场景应用中,并加入修正模块。设每个前提变量 $u_i, u_j (i, j=1, 2, \dots, d; i \leq j)$ 的隶属度函数范围区间为 $[N_i, M_i]$, 设 $[\min(N_i), \max(M_i)]$ 为该稳定状态的有效区间。当检测到归一化的隶属度函数均为 0 时进入修正环节。

考虑到实际应用场景,需要开发一个 TS 模糊模型来对直流电弧炉无功功率进行建模。由于无功变化具有一定的连续性特征,这使得直流电弧炉无功功率模型可以表示为过去瞬时功率值的函数。使用上述提出的 TS 模糊模型来表明无功功率时间序列的非线性模糊性质,如果历史无功功率在某种程度上 ($[0, 1]$ 区间的一个连续范围内) 隶属于某条规则的模糊集,那么模糊模型的输出也将在某种程度上隶属于这条规则,相应的第 l 条规则的 If-Then 语句形式如下:

R_l : If $Q(k-1)$ is $M_{l,1}$ and \cdots and $Q(k-d)$ is $M_{l,d}$

$$\text{Then } Q(k) = p_{l,0} + \sum_{j=1}^d p_{l,j} Q(k-j) \quad (19)$$

式中: $Q(k)$ 为无功功率的当前值; $Q(k-j)$ 为前 j 个时刻样本的无功功率值。如式(19)所示,后件部分为一阶线性函数。

通过增加模糊前提变量的数量可以提高生成模型的准确性,不过在线计算量也随之增加。为了在模型精度和计算量之间取得平衡,文中设置模糊前提变量数 $d=4$,初始模糊子空间数 $N=2$ 。三角模糊集参数 $a_{l,j}, b_{l,j}$ 和 $c_{l,j}$ 根据各自变量所属范围取值, $a_{l,j}, c_{l,j}$ 分别取范围上、下限值, $b_{l,j}$ 取范围中值,修正环节中 a 取 0.1。

使用前述 6 个步骤建立相应的模糊系统并对无功功率进行预测,使用修正方法的改进 TS 模糊模型与经典 TS 模糊预测模型的实际应用效果对比如图 6 所示。

可以看出,改进后的 TS 模糊算法应用于波动无功预测时输出无异常值出现,提高了经典 TS 模糊预测方法应用于波动序列的准确性和可靠性。该修正方法简单实用,有良好的实际应用效果。

3 模糊预测在闪变优化控制中的应用

在实际工程应用中,根据控制对象的特性,SVC 可以在开环和闭环 2 种控制策略中选择。闭环控制

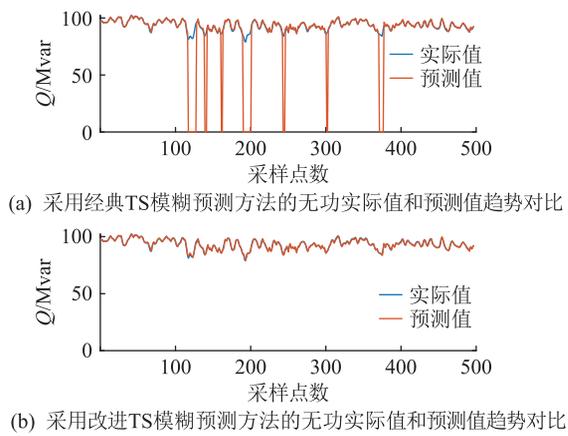


图6 实测无功与 TS 模糊预测无功趋势对比

Fig.6 Comparison of measured reactive power and TS fuzzy prediction reactive power trend

引入反馈环节,能使被控量较为精准地跟随给定值,然而反馈环节的加入增加了系统的响应时间。而开环控制的优点是响应十分迅速,虽然在精度上弱于闭环控制,但对于直流电弧炉等强时变、非线性的负载,较小的时延会带来更好的闪变改善效果。相关研究表明,闪变改善效果与补偿器时延密切相关,当无功补偿率 C 为 80%,补偿器延时为 10 ms 时,闪变改善率 λ 约为 50%;当补偿器延时超过 20 ms,则几乎不能有效补偿闪变。

基于上述原因,文中针对直流电弧炉负载采用开环控制策略,并在该策略下提出结合功率预测的 SVC 滚动预测控制技术,考虑到能量具有惯性,无功功率的当前值会受前 d 个历史值影响,因此理论上根据历史数据训练的模型在短时间内对未来数据仍有很好的拟合效果。滚动控制流程如图 7 所示,其中 $\hat{Q}(k+1)$ 为预测值。

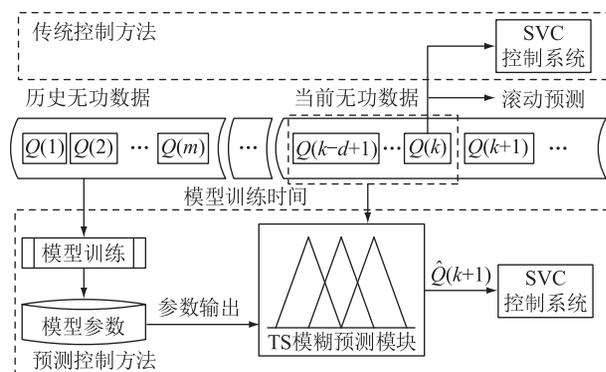


图7 模糊预测滚动控制流程

Fig.7 Flow chart of fuzzy predictive rolling control

(1) 处理无功功率数据:为预测直流电弧炉的无功功率,需要对无功数据进行分析,确保分析间隔与预测时间尺度相匹配。考虑到 TCR 响应时间,预测时间应该提前至少 10 ms,因此无功计算间隔

不应超过 10 ms。文中采用了 10 ms 的间隔来分析无功功率,以进行预测控制。

(2) 模型训练与参数寻优:利用前 d 个时刻数据预测下一时刻数据,通过历史无功数据训练模糊模型参数,通过寻优算法寻找合适的三角模糊集参数及后件参数,当满足停止搜索条件后,模糊预测模型参数确定;此外预留模型训练时间,实现模型参数的滚动训练。

(3) 预测控制:将确定的预测模型参数输入到 SVC 控制器的预测模块中,预测模块可以进行超短期预测,预测直流电弧炉的无功功率。预测结果输入到 SVC 控制系统中,以实现直流电弧炉无功功率半周期的滚动预测控制。

4 仿真分析

在仿真平台建立含直流电弧炉和 SVC 补偿装置的配电系统模型,见图 8, T 为变压器; $TR1$ 、 $TR2$ 为整流器; K 、 A 分别为炉顶电极和炉底电极。其中,220 kV 系统短路容量为 4 010 Mvar;供电变压器额定电压为 220 kV/37 kV,额定容量为 180 MV·A,阻抗电压为 14%;炉变变压器额定电压为 35 kV/0.8 kV,额定容量为 140 MV·A,阻抗电压为 10%,SVC 容量为 160 Mvar;仿真步长为 7.8125×10^{-5} s。

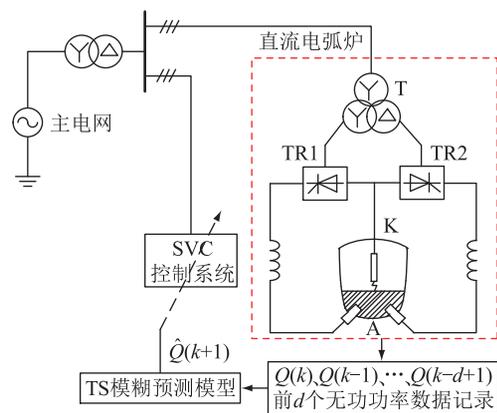


图8 含直流电弧炉和 SVC 补偿装置的配电系统模型示意

Fig.8 Schematic diagram of distribution system model with DC arc furnace and SVC compensation device

此外,为评估所提改进 TS 模糊预测方法与 SVC 结合后在闪变抑制方面的性能,基于现场实测数据并进行仿真分析,模拟了以下 3 种场景。

场景一:SVC 退出运行,直流电弧炉无功功率波动将直接注入电网。

场景二:SVC 投入运行,采用传统的 SVC 控制策略,没有无功功率预测模块,TCR 模块的等效电纳根据当前的无功功率计算得到。

场景三:SVC 投入运行,采用所提出的预测方法与传统 SVC 控制系统结合,提前半个周期预测未来的无功功率波动,以弥补 SVC 响应的延迟。

4.1 所提方法有效性验证

3 种场景下,主电网提供的无功功率时序曲线如图 9 所示。

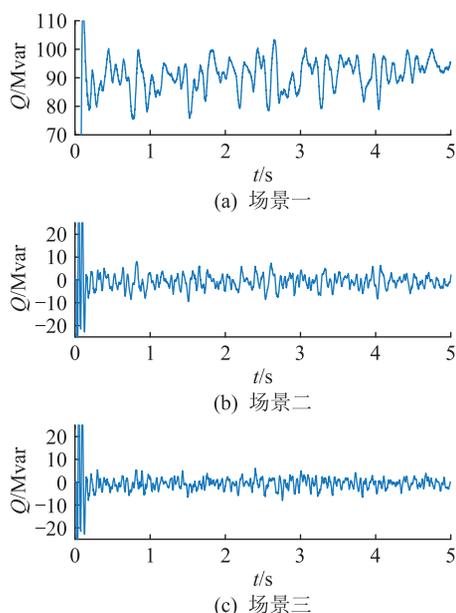


图 9 无功功率变化趋势

Fig.9 Reactive power change trend

其中场景三采用的预测块是利用 0~10 s 的数据训练模型参数,预测 15~20 s 的数据,数据统计从预测模块投入的 0.5 s 后开始计算。由图 9(b)可看出,采用传统控制方法时,SVC 不能完全补偿直流电弧炉无功功率,应由主电网提供相应无功功率的缺额。将图 9(b)与图 9(c)进行对比,发现采用预测模块后,网侧无功功率的波动更加平缓。

具体统计数据见表 1,其中将网侧无功波动改善率 g 定义为:

$$g = [(J_0 - J) / J_0] \times 100\% \quad (20)$$

式中: J 为不同场景下无功功率波动区间的大小; J_0 为场景一下 SVC 退出运行时的无功功率波动区间大小。根据表 1 可以看出,场景三下的无功波动改善率提高到了 61.03%,证明与传统的 SVC 控制情况相比,该方法可以提供更低的源无功功率变化。

表 1 3 种场景下无功功率波动情况统计

Table 1 Statistics of reactive power fluctuation in three scenarios

场景	无功功率值波动区间/Mvar	95% 概率值区间/Mvar	$g/\%$
一	[75.44, 103.38]	[80.56, 98.88]	
二	[-9.50, 8.10]	[-5.65, 3.81]	48.36
三	[-8.05, 6.11]	[-4.51, 2.63]	61.03

为比较改进 TS 模糊预测控制与传统 SVC 控制的无功功率跟随能力,文中还选用互相关函数计算最大时延。如图 10 所示,传统控制方法下,负载功率与 SVC 输出功率在滞后 166 点处互相关系数达到最大,结合仿真采样间隔为工频下一周期 256 个点,则相应时延为 13.0 ms;而在模糊预测控制策略下,互相关系数在滞后 30 点处达到最大,相应时延为 2.3 ms。

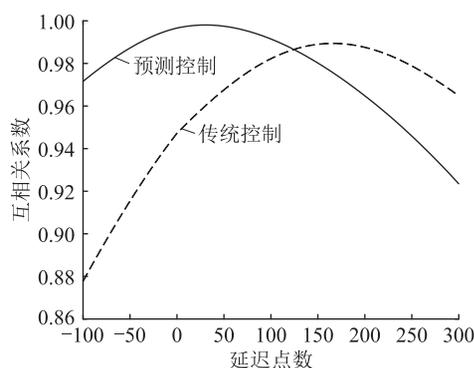


图 10 2 种控制策略下 SVC 和负载无功功率的互相关系数

Fig.10 The cross-correlation number of SVC and load reactive power under two control strategies

此外,还选用了不同运行时间段下的 10 条数据对算法的普适性进行验证,仿真结果见表 2。根据统计结果,对于直流电弧炉等强冲击性负载,场景二和场景三下的无功波动改善率平均为 47.32% 和 64.48%,SVC 在传统控制策略下平均响应延迟时间约为 15.66 ms,而在改进 TS 模糊预测控制策略下,平均响应延迟时间缩短到 2.68 ms,可见所提控制方法对电压波动与闪变现象改善效果显著。

表 2 SVC 发出无功延迟时间统计

Table 2 SVC reactive power delay time statistics

记录数据条数	传统 SVC 控制延迟点数	传统 SVC 控制延迟时间/ms	模糊预测控制延迟点数	模糊预测控制延迟时间/ms	$g/\%$	
					场景二	场景三
1	166	13.0	30	2.3	48.4	60.0
2	147	11.5	33	2.6	50.1	58.3
3	175	13.7	44	3.4	47.8	55.7
4	186	14.5	29	2.3	46.2	60.9
5	142	11.1	72	5.6	50.6	50.4
6	157	12.3	35	2.7	49.3	57.9
7	242	18.9	17	1.3	43.4	73.3
8	221	17.3	22	1.7	44.5	66.8
9	300	23.4	51	4.0	39.2	53.1
10	267	20.9	12	0.9	53.7	78.4

4.2 所提方法与传统方法的对比分析

考虑到短时间闪变值 P_{st} 的基本记录周期为 10 min,文中仅为短时仿真分析,而 P_{st} 可根据 $S(t)$ 作出的累积概率函数曲线进行计算,因此瞬时闪变视感度 S 也可衡量闪变强弱。定义闪变改善率 λ 为:

$$\lambda = \frac{S(t) - S_0(t)}{S_0(t)} \times 100\% \quad (21)$$

式中: $S_0(t)$ 、 $S(t)$ 分别为补偿装置退出和投运工况下母线的瞬时闪变视感度。

根据 IEC 61000 闪变仪计算方法,仿真计算了 SVC 不同控制策略下 35 kV 母线瞬时闪变视感度 $S(t)$ 曲线。对改进 TS 模糊算法与经典 TS 模糊算法的闪变抑制效果进行对比,如图 11 所示。

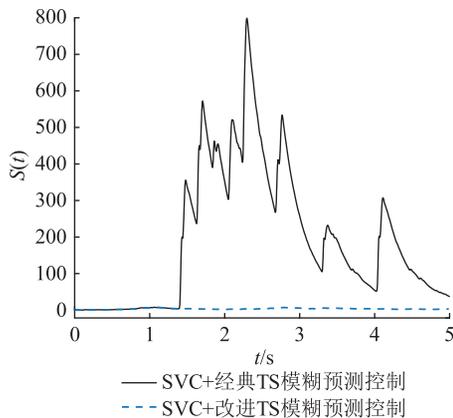


图 11 2 种控制策略下瞬时闪变视感度曲线
Fig.11 Instantaneous flicker visual sensitivity curves of two control strategies

由图 11 可以看出,应用经典 TS 模糊预测控制方法时,突变异常值的出现会导致瞬时闪变视感度曲线的飙升,闪变现象严重。改进后的 TS 模糊预测控制无异常值出现,更适用于闪变抑制场景。

再将 SVC 结合改进 TS 模糊算法与其他控制策略下的闪变抑制效果进行对比,如图 12 所示。由图 12 可以看出,文中所提的预测控制技术与 SVC 结合可以得到更显著优异的结果。

图 13 用箱线图形式进一步展示了传统 SVC 控制、SVC 结合 ARMA 预测控制、SVC 结合文中所提改进 TS 模糊预测控制 3 种策略下的 SVC 退出工况的闪变改善效果情况,其中箱线图中位数分别为 48.21%、62.87%、74.53%。传统 SVC 控制方法的改善率区间为 $[-0.26\%, 73.13\%]$,甚至出现了负值,这说明传统 SVC 控制响应迟缓,无法快速跟随波动剧烈的电弧电阻变化,无功变化剧烈时,SVC 不仅无法缓解闪变,甚至会加重影响。

箱线图具体数据统计结果如表 3 所示,为更好地体现所提方法的优越性,将传统方法的平均改进

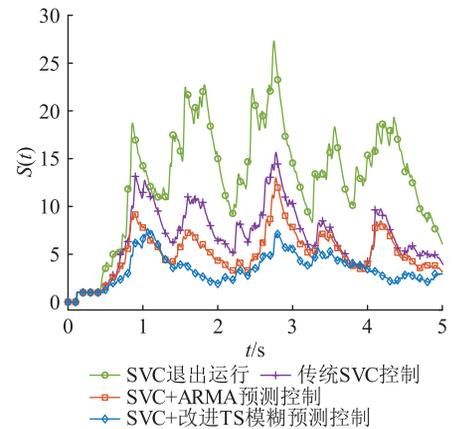


图 12 不同控制策略下瞬时闪变视感度曲线
Fig.12 Instantaneous flicker sensitivity curves under different control strategies

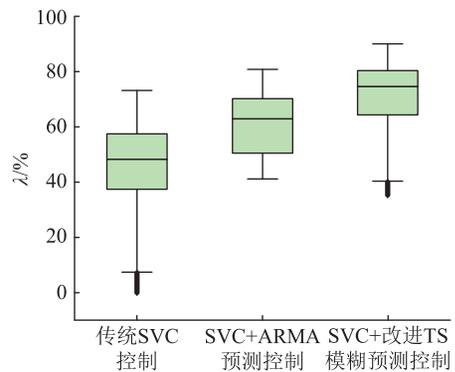


图 13 3 种控制策略下闪变改善率箱线图
Fig.13 Flicker improvement rate box plot under three control strategies

率定义为:不同控制策略下平均改善率与传统 SVC 控制策略下平均改善率之差除以传统 SVC 控制策略下的平均改善率。

表 3 3 种方法下闪变改善率统计

策略	平均改善率	最大改善率	95%概率大值	对传统方法的平均改进率
传统 SVC 控制	46.83	73.13	68.17	
SVC+ARMA 预测控制	60.71	80.78	74.61	29.64
SVC+改进 TS 模糊预测控制	72.20	90.00	87.67	54.17

传统线性 ARMA 方法无法准确描述直流电弧炉的非线性特征,影响了预测建模效果;相比之下,改进后的 TS 模糊算法既能很好地反应电弧炉无功数据非线性和模糊特征,又能对异常值进行检测与修正,在预测建模中有更高的精度和可靠性。图 12、图 13 和表 3 均证明了文中所提方法优于传统

SVC 控制方法、ARMA 预测控制方法以及经典 TS 模糊预测控制方法,对闪变抑制改善效果明显。

5 结论

为了提高 SVC 对直流电弧炉等强冲击性负荷的闪变抑制性能,文中提出了一种基于改进 TS 模糊算法的 SVC 滚动预测控制优化方法,研究得出结论如下:

(1) 在直流电弧炉周期性的弧流调节过程中,晶闸管触发角的快速变化会引起无功功率的剧烈波动,进而造成电压波动和闪变。

(2) 所提的改进 TS 模糊预测算法,分析了经典 TS 模糊算法具体场景应用中异常值的出现机理,并给出了修正流程,减少了异常值对闪变抑制造成的严重影响。

(3) 所提方法较 SVC 传统控制方法、ARMA 预测控制方法、经典 TS 模糊预测控制方法均表现出更好的闪变抑制性能。

未来可进一步考虑将现场因素加入前提变量,将直流电弧炉物理特性与模糊预测技术紧密结合,并建立预测异常报警机制,以满足电弧炉治理工程应用需求。

参考文献:

[1] 侯晓蕾,孙慧如,孙凯祺,等. 多约束储能自适应控制及电能质量提升方法[J]. 供用电,2023,40(10):2-9.
HOU Xiaolei,SUN Huiru,SUN Kaiqi,et al. Multi-constraint adaptive control strategy for energy storage based on VSG[J]. Distribution & Utilization,2023,40(10):2-9.

[2] 何国锋,周子淳,张国勇,等. 孤岛光伏并联逆变器系统的固定时间模糊反步控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(18):147-156.
HE Guofeng,ZHOU Zichun,ZHANG Guoyong,et al. Fixed-time fuzzy backstepping control strategy for islanded photovoltaic parallel inverters[J]. Power System Protection and Control,2023,51(18):147-156.

[3] 汪清,游奕弘,赵誉洲,等. 暂态电能质量扰动引发电压变动对闪变检测的影响[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(6):91-99.
WANG Qing,YOU Yihong,ZHAO Yuzhou,et al. Influence of voltage variation caused by transient power quality disturbance on flicker detection[J]. Power System Protection and Control,2022,50(6):91-99.

[4] 吕孝国,孙贤大,王飞义,等. 链式 SVG 抑制电弧炉闪变控制策略研究[J]. 电力电子技术,2020,54(8):49-52.
LÜ Xiaoguo,SUN Xianda,WANG Feiyi,et al. Study of the control strategy of chain SVG to restrain the flicker of electric arc furnace[J]. Power Electronics,2020,54(8):49-52.

[5] 齐超. 风电场动态无功补偿装置性能检测方案研究[J]. 黑龙江电力,2021,43(3):241-245,262.

QI Chao. Research on performance test scheme of dynamic reactive power compensation device in wind farm[J]. Heilongjiang Electric Power,2021,43(3):241-245,262.

[6] 郑惠萍,曾鹏,刘新元,等. 基于误差前馈预测的多时空尺度风电集群有功功率分层控制策略[J]. 电力建设,2020,41(8):120-128.
ZHENG Huiping,ZENG Peng,LIU Xinyuan,et al. Active power layered control strategy based on error feedforward prediction for multiple temporal and spatial scales wind power cluster[J]. Electric Power Construction,2020,41(8):120-128.

[7] 伍双喜,谭嫣,李宇骏,等. 基于最大转子储能的风电场风机变利用率的有功功率分配策略优化[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(12):152-161.
WU Shuangxi,TAN Yan,LI Yujun,et al. Optimization of a variable utilization level scheme for load sharing control of a wind turbine in a wind farm based on maximum rotor energy storage[J]. Power System Protection and Control,2022,50(12):152-161.

[8] 叶林,路朋,赵永宁,等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6181-6198.
YE Lin,LU Peng,ZHAO Yongning,et al. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(18):6181-6198.

[9] ZHANG B,JIA M,CHEN C,et al. Wind farm active power dispatching algorithm based on Grey Incidence[J]. Global Energy Interconnection,2023,6(2):175-183.

[10] 卞海红,孙健硕. 基于典型气象周的 GRNN 光伏发电量预测模型[J]. 电力工程技术,2021,40(5):94-99.
BIAN Haihong,SUN Jianshuo. Photovoltaic power generation prediction model based on optimized TMY Method-GRNN[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(5):94-99.

[11] 张家安,王琨玥,陈建,等. 基于空间相关性的分布式光伏出力预测[J]. 电力建设,2020,41(3):47-53.
ZHANG Jiaan,WANG Kunyue,CHEN Jian,et al. Research on prediction of distributed photovoltaic output considering spatial relevance[J]. Electric Power Construction,2020,41(3):47-53.

[12] 张翰霆,陈俊,陈根永. 基于 SEELM 多专家模型的分布式光伏系统负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(10):69-75.
ZHANG Hanting,CHEN Jun,CHEN Genyong. An SEELM-based ensemble method for load forecasting in a distributed photovoltaic systems[J]. Power System Protection and Control,2022,50(10):69-75.

[13] 朱贺,王静,宋艳慧,等. 电弧炉电极调节器控制系统设计[J]. 工业加热,2023,52(2):12-14.
ZHU He,WANG Jing,SONG Yanhui,et al. Design of control system for electrode regulator of electric arc furnace[J]. Industrial Heating,2023,52(2):12-14.

[14] 杨凌志,薛波涛,宋景凌,等. 电弧炉炼钢炉渣成分实时预

- 报模型[J]. 工程科学学报,2020,42(S1):39-46.
- YANG Lingzhi, XUE Botao, SONG Jingling, et al. Real-time prediction model of slag composition in electric arc furnace steelmaking[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(S1):39-46.
- [15] 张家磊,李占春,石晨敏,等. 电弧炉终点碳含量预测模型的构建与分析[J]. 炼钢,2022,38(6):1-5,37.
- ZHANG Jialei, LI Zhanchun, SHI Chenmin, et al. Construction and analysis of end-point carbon content prediction model for electric arc furnace[J]. Steelmaking, 2022, 38(6):1-5, 37.
- [16] 王育飞,孙路,张剑云,等. 交流电弧炉供电网波动电压超短期混沌预测方法[J]. 电测与仪表,2017,54(18):48-53.
- WANG Yufei, SUN Lu, ZHANG Jianyun, et al. Chaotic prediction of fluctuant voltage time series acquired from EAF power supply grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(18):48-53.
- [17] KETABIPOUR S, SAMET H, VAFAMAND N. TS fuzzy prediction-based SVC compensation of wind farms flicker: a dual-UKF approach[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(6):1594-1602.
- [18] SAMET H, BAGHERI A A. Enhancement of SVC performance in flicker mitigation of wind farms[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(15):3823-3834.
- [19] SAMET H, KETABIPOUR S, AFRASIABI S, et al. Prediction of wind farm reactive power fast variations by adaptive one-dimensional convolutional neural network[J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 96:107480.
- [20] SAMET H, MOJALLAL A, GHANBARI T, et al. Enhancement of SVC performance in electric arc furnace for flicker suppression using a Gray-ANN based prediction method[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(4):e2811.
- [21] 贾春苗,傅忠宁,马亚玲,等. 基于 ARMA 模型与多元回归的甘宁区铁路货运量预测[J]. 综合运输,2022,44(9):147-154.
- JIA Chunmiao, FU Zhongning, MA Yaling, et al. Freight volume forecast of Gan-ning district railway based on ARMA model and multiple regression[J]. China Transportation Review, 2022, 44(9):147-154.
- [22] 黄世泽,张肇鑫,张帆,等. 基于自回归滑动平均模型的道岔动作电流故障曲线预测方法[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(12):52-55.
- HUANG Shize, ZHANG Zhaoxin, ZHANG Fan, et al. Prediction method of ARMA-based turnout operation current fault curve[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(12):52-55.
- [23] 刘紫薇,杨晓忠. 一种基于 CS-FCM 算法的模糊时间序列预测模型[J]. 应用数学学报,2022,45(3):322-338.
- LIU Ziwei, YANG Xiaozhong. A fuzzy time series forecasting model based on CS-FCM algorithm[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2022, 45(3):322-338.
- [24] ULLOA-CAZAREZ R L, GARCÍA-DÍAZ N, SORIANO-EQUIGUA L. Multi-layer adaptive fuzzy inference system for predicting student performance in online higher education[J]. IEEE Latin America Transactions, 2021, 19(1):98-106.
- [25] 谭小钰,刘芳,马俊杰,等. 基于 DBN 与 T-S 时变权重组合的光伏功率超短期预测模型[J]. 太阳能学报,2021,42(10):42-48.
- TAN Xiaoyu, LIU Fang, MA Junjie, et al. Ultra-short-term PV power forecasting model based on DBN and T-S time-varying weight combination[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10):42-48.
- [26] BRACALE A, CARAMIA P, DE FALCO P, et al. DC electric arc furnace modelling for power quality indices assessment [C]//2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Dubai, United Arab Emirates. IEEE, 2020:1-6.
- [27] 王晓勇,龚亮,张谦,等. 交直流电弧炉电能质量特性对比分析[J]. 冶金设备,2022(S1):28-32.
- WANG Xiaoyong, GONG Liang, ZHANG Qian, et al. Comparative analysis of power quality characteristics of AC/DC arc furnace[J]. Metallurgical Equipment, 2022(S1):28-32.
- [28] 徐龙. 直流电弧炉工业硅冶炼过程的传热特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
- XU Long. Study on heat transfer characteristics of industrial silicon smelting process in DC arc furnace[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [29] 周文,苏灿,高敏,等. 直流电弧炉无功超短期滚动预测及控制[J]. 电力系统及其自动化学报,2023,35(1):96-102.
- ZHOU Wen, SU Can, GAO Min, et al. DC EAF reactive power ultra-short-term rolling prediction and control[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2023, 35(1):96-102.
- [30] 陈华昊,李博士,张艳. 基于模糊逻辑的多机电力系统事件控制[J]. 模糊系统与数学,2021,35(1):131-143.
- CHEN Huahao, LI Boshi, ZHANG Yan. Event-triggered control of multi-power system based on fuzzy logic[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2021, 35(1):131-143.

作者简介:



朱明星

朱明星(1968),男,硕士,教授,研究方向为电能质量分析与控制(E-mail:zhumingxing@ahu.edu.cn);

许路遥(1998),女,硕士在读,研究方向为电能质量分析与控制;

高敏(1985),男,博士在读,研究方向为电能质量分析与控制。

Flicker suppression optimization of DC arc furnace based on improved TS fuzzy algorithm

ZHU Mingxing^{1,2}, XU Luyao¹, GAO Min^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230039, China;

2. Anhui University Green Industry Innovation Research Institute, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to improve the flicker suppression performance of static var compensator (SVC) in response to impact loads such as DC electric arc furnace, a SVC rolling predictive control method based on the improved Takagi-Sugeno (TS) fuzzy algorithm is proposed. Firstly, the electrical model of DC electric arc furnace is established and its reactive power characteristics are simulated and analyzed. Then, an improved method of range adaptive correction is proposed to address the issue of abnormal output set to 0 when the classical TS fuzzy prediction algorithm is applied to fluctuating loads. This method can eliminate the outliers caused by the application mechanism of a class of algorithms, so as to improve the reliability and accuracy of TS fuzzy algorithm for reactive power prediction of fluctuating loads. Finally, based on the model training time constraint, a reactive power half-cycle rolling predictive control model is established to predict the reactive power 10 ms in advance. It is competent to improve the lag characteristics of the traditional SVC control system response. The simulation results show that the average flicker improvement rate of the proposed method increases by 54.17% compared with the traditional SVC control method, and the suppression effect of flicker phenomenon is significantly improved.

Keywords: Takagi-Sugeno (TS) fuzzy algorithm; DC arc furnace; static var compensator (SVC); predictive control; anomaly correction; flicker suppression

(编辑 钱悦)

(上接第 94 页)

High-frequency coupling current calculation model of overhead multi-conductor transmission lines in electric power system

XIE Weichen, GUO Jun, ZHENG Qunshuang, XIE Yanzhao

(Xi'an Jiaotong University (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment), Xi'an 710049, China)

Abstract: Overhead transmission lines are the significant component of electric power system, where the over current can be coupled with the transient electromagnetic field or excitations (such as high-altitude electromagnetic pulse). As the coupling path of strong electro-magnetic interference, overhead transmission lines cause serious interference to the power system. Among the existing modelling methods, the classical transmission line theory may generate large error when dealing with the high-frequency coupling problem, where the cross dimension of the transmission line is not electrically small. Numerical full-wave method (such as moment of method) which relies on the grid subdivision with low efficiency when dealing with long transmission lines. Moreover, the number of cables is usually large in electric power system, and the ground are considered as the lossy ground. Therefore, to address the above mentioned problems, an asymptotic method is proposed to calculate the high-frequency coupling current along overhead transmission lines in electric power system. Based on the asymptotic theory with high calculation efficiency, the scattering and reflection process are introduced to quantify higher-order model components. In addition, the arbitrary number of wires, arbitrary parameters of the ground and different excitations are considered to derive the current expression. Finally, the validity and reliability of the proposed method are tested using the full-wave simulation and antenna irradiation experiment. The proposed method can quickly calculate high-frequency coupling current, which can provide theoretical basis and data support for protection and electromagnetic effect study of overhead transmission lines.

Keywords: overhead transmission lines; lossy ground; asymptotic method; high-frequency coupling current; full-wave numerical algorithm; antenna irradiation experiment

(编辑 吴楠)