

引用格式:戚沁雅,曹伯仲,安义,等.基于改进 Prony 算法的配电变压器群励磁涌流多特征综合辨识方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):69-78.

Citation: QI Qinya, CAO Bozhong, AN Yi, et al. Comprehensive multi-feature identification method of magnetizing inrush current in distribution transformers based on improved Prony algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 69-78.

基于改进 Prony 算法的配电变压器群励磁涌流 多特征综合辨识方法

戚沁雅¹, 曹伯仲², 安义¹, 陈春²

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西南昌 330012; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 配电变压器空载合闸时会产生励磁涌流, 其值若大于线路保护整定值, 将导致断路器合闸失败, 因此需对励磁涌流和一般短路电流进行辨识, 使断路器能够躲过励磁涌流, 实现正常合闸。为此, 提出基于改进 Prony 算法的配电变压器励磁涌流多特征综合辨识方法, 分析单台及多台配电变压器的励磁涌流特征, 引入后向预测环节改进传统 Prony 算法, 提高励磁涌流识别准确度; 综合对比分析励磁涌流基波衰减因子法、二次谐波判别法、小波分解识别法的优缺点及适用范围, 提出多特征判别体系的配电变压器励磁涌流与故障电流的综合辨识方法, 提高励磁涌流的辨识准确性。以现场故障电流与励磁涌流的录波样本作为识别对象, 与单特征方法以及小波分解识别算法对比, 验证所提算法的有效性与工程可行性。

关键词: 配电变压器; 改进 Prony 算法; 二次谐波含量; 多特征判别体系

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.008 中图分类号: TM421 文章编号: 1673-9140(2024)06-0069-10

Comprehensive multi-feature identification method of magnetizing inrush current in distribution transformers based on improved Prony algorithm

QI Qinya¹, CAO Bozhong², AN Yi¹, CHEN Chun²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330012, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The magnetizing inrush current will be generated when the distribution transformer is closed with no load. If its value is greater than the setting value of line protection, the circuit breaker will fail to close. Therefore, it is necessary to identify the magnetizing inrush current and the general short-circuit current so that the circuit breaker can avoid the magnetizing inrush current and achieve normal closing. A comprehensive multi-feature identification method of magnetizing inrush current in distribution transformers based on an improved Prony algorithm is proposed, and the characteristics of magnetizing inrush current of one and multiple distribution transformers are analyzed. Backward-prediction link is introduced to improve the traditional Prony algorithm and improve the accuracy of magnetizing inrush current identification. The advantages, disadvantages, and application scope of the fundamental wave attenuation factor method, the second harmonic discrimination method, and the wavelet decomposition identification method of the magnetizing inrush current are comprehensively compared. A comprehensive identification method of the magnetizing inrush current and fault current of the distribution transformers based on a multi-feature discrimination system is put forward to improve the identification accuracy of the magnetizing inrush current. The recorded samples of field fault current and magnetizing inrush current are taken as identification objects, and the proposed algorithm is compared with the single feature method and wavelet decomposition identification algorithm, verifying its effectiveness and engineering feasibility.

Key words: distribution transformer; improved Prony algorithm; second harmonic content; multi-feature discrimination system

收稿日期: 2022-12-17; 修回日期: 2023-12-23

基金项目: 国网江西省电力有限公司科技项目(52182022000C); 国家自然科学基金(52007009); 湖南省自然科学基金(2020JJ5574)

通信作者: 曹伯仲(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护研究; E-mail: 1297620063@qq.com

配电变压器是配电网中的重要组成部分,当10 kV线路合闸恢复运行时,若其带负载启动,则会产生电弧烧坏变压器,所以配电变压器应空载或轻载。由于其铁芯磁通不能突变,将出现一个非周期分量磁通,致使磁通饱和,产生数值较大的励磁涌流,造成线路开关甚至变电站出口开关屡送屡跳,影响配电网供电服务质量,降低配电网继电保护的可靠性。因此,学者们针对此现状开展了大量研究。

文献[1]分析了变压器空载合闸内部磁通关系,从本质上解释了励磁涌流产生的原因。在此基础上,学者们进一步提出了励磁磁通关系式^[2],分析了多台变压器空载合闸时磁通相互影响的情况^[3-4],但未给出励磁涌流具体计算式。目前,对于励磁涌流的处理大部分集中在抑制上,包括对高压侧线路串联电阻、变压器低压侧串联电容、通过控制合闸角实现选相合闸^[5-7]。加入负温度系数电阻(negative temperature coefficient, NTC)可抑制励磁涌流,NTC在温度升高时表现出电阻降低。在励磁涌流产生过程中,NTC在低温(例如室温)下的电阻很高,它将励磁涌流限制在标称电流值的几倍,而不是10倍或更多^[8]。这些方法都能在一定程度上抑制励磁涌流,但对于已建成的配电网,增设电阻电容会增大建设成本,且随着接入变压器数量的增加,通过串联电阻的效果会下降,而对于选相合闸来说,三相变压器若控制了某一相不产生励磁涌流,其余两相仍然会有励磁涌流。因此,可从继电保护出发,对励磁涌流与系统短路电流进行区分,使继电器躲过励磁涌流进行合闸。

针对励磁涌流,现有研究主要通过二次谐波含量法对故障电流进行识别^[9-11]。励磁涌流因其非线性特性,会产生大量二次谐波,远高于短路电流,但其判定受系统合闸角影响,存在某些时刻二次谐波含量较低的情况,且随着新能源的广泛接入,短路电流中谐波含量提高,导致单纯降低二次谐波整定值会影响识别准确率。文献[12-15]分析了励磁涌流与故障电流周期分量的衰减特性,通过Prony算法拟合得出故障电流各周期分量的频率、幅值、衰减因子等,比较衰减因子即可区分故障电流。但传统Prony算法计算繁杂,不能满足继电保护速断性要求,且上述研究未考虑合闸角对衰减因子的影响。此外,文献[16]通过动态四边形法则,在故障波形上选取四点构建平行四边形,比较励磁涌流与短路电流四边形角度的不同以区分两者,但未研究

变压器不同连接组别的影响。

本文首先分析单台变压器励磁磁通关系式,以及励磁涌流产生原因,通过磁通关系式分析变压器进入与退出饱和时间,并以此给出励磁涌流近似计算式;然后,分析传统Prony算法在计算上的不足,提出改进Prony算法,实现计算速度与准确度的提升;同时,对励磁涌流进行谐波分析,从幅度层面计算二次谐波含量、基波比值与系统合闸角的关系,并与改进Prony算法结合使用,在MATLAB中进行大量仿真,以验证识别的准确性及快速性;最后,通过现场实测波形进一步验证算法准确性。

1 励磁涌流特性分析

1.1 单台配电变压器励磁涌流磁通分析

当线路由故障到通电时,配电变压器处于空载状态,其单相等效模型如图1所示。其中, U_s 为系统电源, i_s 为线路电流, R_1 、 R_s 分别为一次侧阻抗与系统阻抗, L_m 为一次侧电感与变压器励磁电感。

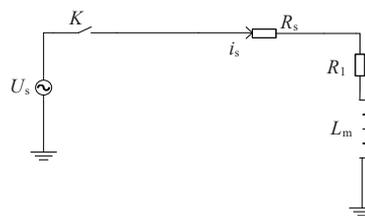


图1 变压器等效模型

Figure 1 Equivalent model of transformer

根据图1建立电压与磁通关系式为

$$U_s = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = U_s - i_s(R_1 + R_s) \quad (2)$$

式(9)、(10)中, U_m 为交流电压峰值; α 为合闸角; Φ 为磁通。

变压器通电瞬间,磁通未饱和,此时励磁电感为常数 L_m ,又因 $\Phi = i_s L_m$,所以式(2)可化简为一阶常系数微分方程:

$$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{\Phi}{L_1}(R_1 + R_s) = U_s \quad (3)$$

解此一阶线性微分方程得:

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\Phi_r + \Phi_m \cos \alpha) e^{-\frac{(R_1 + R_s)t}{L_1}} \quad (4)$$

式中, $\Phi_m = \frac{U_m L_1}{\sqrt{(R_1 + R_s)^2 + (L_1 \omega)^2}}$ 为稳态磁通; Φ_r 为剩磁。

1.2 多台配电变压器励磁涌流磁通分析

相较于变压器并列运行,配电网中变压器之间距离远近各不相同,因此,需考虑每台变压器之间的系统阻抗。又因励磁涌流是由配电变压器一次侧通入电流后稳态磁通与暂态磁通叠加而产生的,所以应先分析每台配电变压器空载合闸时一次侧电流。多台变压器运行等效模型如图2所示。

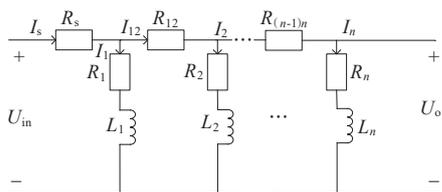


图2 多台变压器运行等效模型

Figure 2 Equivalent model of multiple transformers during operation

已知输入电压为 $U_{in} = U_m \sin(\omega t + \alpha)$,各变压器一次侧阻抗为 R_1, R_2, \dots, R_n ,变压器之间阻抗为 $R_{12}, R_{23}, \dots, R_{(n-1)n}$,电流为 I_1, I_2, \dots, I_n 。设配电网中有 n 台变压器,结合串、并联的分压、分流概念,可建立输入电压、电流与输出电压、电流的关系式如下:

$$\begin{bmatrix} R_s & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & Y_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & R_{23} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & Y_{n-1} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & R_{(n-1)n} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & Y_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ U_1 \\ I_{12} \\ U_2 \\ I_2 \\ \vdots \\ U_{n-1} \\ I_{(n-1)n} \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{in} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, Y_1, Y_2, \dots, Y_n 分别为变压器一次侧阻抗 R_1, R_2, \dots, R_n 的倒数; U_1, U_2, \dots, U_n 分别为变压器两端电压; I_s 为线路总电流; I_{12} 为第一台配电变压器后线路电流; $I_{(n-1)n}$ 为第 $n-1$ 台配电变压器后线路电流,与最后一台配电变压器一次侧电流 I_n 相等。

根据矩阵方程可求得流过每台变压器的电流,为简化分析,本次计算选取2台配电变压器,若变压器

器台数增加,分析方法不变。矩阵方程简化为

$$\begin{bmatrix} R_s & 1 & 0 & 0 \\ -1 & Y_1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & R_{12} & 1 \\ 0 & 0 & -1 & Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ U_1 \\ I_{12} \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{in} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

求解矩阵方程可得系统电流与第一台变压器电流关系为

$$I_s = \left(1 + \frac{R_1}{R_{12} + R_2}\right) I_1 \quad (7)$$

式中, I_1 为首台变压器流过的电流,对第一台变压器进行分析得出:

$$\frac{d\Phi}{dt} = U_s - I_1 \left(R_1 + R_s + \frac{R_1 R_s}{R_{12} + R_2} \right) \quad (8)$$

令 $R_1 + R_s + \frac{R_1 R_s}{R_{12} + R_2} = R'$, 则可求得第一台变压器励磁磁通关系式为

$$\Phi_1 = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\Phi_r + \Phi_m \cos \alpha) e^{-\frac{R't}{L_1}} \quad (9)$$

式中, $\Phi_m = \frac{U_m L_1}{\sqrt{(R')^2 + (L_1 \omega)^2}}$, 且 R' 要大于单台变

压器运行时系统阻抗与变压器一次侧阻抗之和,即多台变压器同时空载合闸时变压器励磁磁通要小于单台变压器运行时的励磁磁通,其原因是相较于单台变压器,多台变压器接入配电网时,每台变压器都有分流作用,使流过单台变压器的电流减小,励磁磁通减小。

1.3 励磁涌流产生原因

由式(4)可知,配电变压器在空载合闸时,产生的磁通是稳态磁通的2~3倍,而合闸角是影响磁通饱和的关键要素。根据变压器铁芯饱和特性,当磁通饱和后,励磁电感显著下降,如图3所示,因磁通饱和导致励磁电感变小,励磁涌流呈现出尖顶波而非正弦波。

励磁涌流呈现2种状态,即未饱和状态与饱和状态。饱和状态前后又分为3个阶段:饱和前阶段、饱和阶段、饱和后阶段。设变压器饱和磁通为 Φ_s , 变压器进入饱和阶段对应时间 t_1 为

$$t_1 \leq \left[\cos^{-1} \left(\frac{\Phi_m \cos \alpha - \Phi_s}{\Phi_m} \right) - \alpha \right] / \omega \quad (10)$$

对应相位为 $\theta_1 = \omega t_1 + \alpha$, 变压器退出饱和阶段时间为 t_2 , 对应相位为 $2\pi - \theta_1$ 。因配电网线路断电时,每台变压器电压相角相同,根据磁通守恒定律,变压器剩磁在下次通电前都不会改变,若变压器参数

一致则多台变压器可认为同时饱和。

根据变压器磁通曲线可知,变压器饱和和阶段电流为

$$i_{\text{rush}} = \frac{\Phi_s}{L_s} (\cos \theta_1 - \cos \theta) \quad (11)$$

式中, θ 为合闸角; L_s 为磁通饱和后的励磁电感。

如图3所示,因磁滞回线以及磁化曲线的非线性特征,感应得到的励磁电流含有诸多衰减因子不同的谐波分量。磁通变化曲线的整体抬高,又造成励磁电流波形产生间断角,这2个显著特征将是区分励磁涌流和故障电流的重要标准。

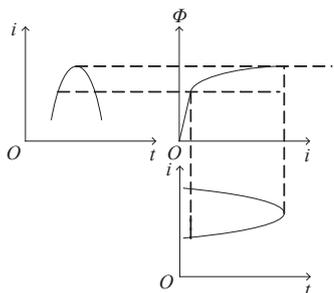


图3 励磁涌流与励磁磁通关系

Figure 3 Relationship between magnetizing inrush current and excitation flux

2 Prony 算法

由上述分析可知,励磁涌流包含大量谐波分量,且基波衰减因子远大于一般故障电流。因此,可以用一系列幅值、频率、相位、阻尼因子不同的正弦(余弦)信号对故障电流进行拟合,得到基波与各次谐波的幅值及衰减因子。

2.1 传统 Prony 算法

Prony 算法用指数函数的一个线性组合来描述等间距采样数据的数学模型,并获得信号的频率、相位、衰减、幅值,其一般表达式为

$$x(t) = \sum_{i=1}^q A_i e^{-\alpha_i t} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (12)$$

式中, A_i 为幅值; α_i 为衰减因子; f_i 为频率; θ_i 为相位; q 为阶数。其离散表达式为

$$x^\wedge(n) = \sum_{i=1}^q A_i e^{-\alpha_i n \Delta t} \cos(2\pi f_i n \Delta t + \theta_i) \quad (13)$$

式中, Δt 为采样间隔。设离散时间函数为

$$x^\wedge(n) = \sum_{i=1}^q b_i z_i^n, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (14)$$

式中, b_i, z_i 为复数,且 $b_i = A_i e^{j\theta_i}, z_i = e^{(-\alpha_i + j2\pi f_i) \Delta t}$ 。

离散时间函数为一组常系数线性差分方程的

齐次解,因此构造特征多项式为

$$\varphi(z) = \prod_{i=1}^q (z - z_i) = \sum_{i=0}^q a_i z^{q-i} \quad (15)$$

式中, $a_0 = 1$, 根据离散时间函数可得 $x^\wedge(n-k) = \sum_{i=1}^q b_i z_i^{n-k}$, k 为时间偏移量,方程两边同时乘 a_k 并求

和得:

$$\sum_{k=0}^q [a_k \cdot x(n-k)] = \sum_{k=0}^q a_k \sum_{i=1}^q b_i z_i^{n-k} = \sum_{i=1}^q b_i z_i^{n-q} \sum_{k=0}^q a_k z_i^{q-k} \quad (16)$$

因 $z = z_i$ 为该多项式特征根,所以式(16)右边为0,可得:

$$\sum_{k=0}^q [a_k \cdot x(n-k)] = 0 \quad (17)$$

其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} x(q) \\ x(q+1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(q-1) & x(q-2) & \cdots & x(0) \\ x(q) & x(q-1) & \cdots & x(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-2) & x(N-3) & \cdots & x(N-q-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_q \end{bmatrix} \quad (18)$$

经过一次最小二乘计算即可求得系数 a_i ($i=1, 2, \dots, q$), 之后根据系数求解特征多项式:

$$\varphi(z) = \prod_{i=1}^q (z - z_i) = \sum_{i=0}^q a_i z^{q-i} \quad (19)$$

求出多项式根 z_1, z_2, \dots, z_q , 将其代入离散时间函数得:

$$\begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ x(2) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_q \\ z_1^2 & z_2^2 & \cdots & z_q^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_q^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_q \end{bmatrix} \quad (20)$$

由式(20)可求得 b_1, b_2, \dots, b_q , 之后根据其一般表达式即可求出信号幅值 A_i 、相位 θ_i 、衰减 α_i 与频率 f_i 如下:

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \text{angle}(b_i) \\ \alpha_i = \text{In}(z_i) / \Delta t \\ f_i = \text{angle}(z_i) / 2\pi \Delta t \end{cases} \quad (21)$$

Prony算法可求出不同频率信号幅值与衰减系数,但Prony算法对噪声极其敏感,因此,需先对采集的信号进行消噪处理。

2.2 改进Prony算法

由式(4)可知,传统Prony算法拟合时若信号包含多种谐波分量,矩阵逆运算困难,导致计算效率低,无法满足电力系统保护速断性要求,且在拟合时无法预知信号的阶数,受噪声干扰大,导致拟合效果不佳。因此,考虑使用前后向线性预测结合的方法构建系统函数^[17],利用线性预测误差滤波器的白化性质,使信号极点都位于Z平面单位圆内。

首先,构建一个含有 m 个极点、 m 个零点的滤波器模型:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_m z^{-m}} \quad (22)$$

式中, $H(z)$ 为长度为 N 的输入信号的Toeplitz形式,因此,构建矩阵方程式为

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & \dots & 0 \\ h_1 & h_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ h_m & h_{m-1} & h_1 & h_0 \\ h_{m+1} & h_m & \dots & h_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_N & h_{N-1} & \dots & h_{N-m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} \quad (23)$$

将矩阵分块得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{b} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_0 \quad H_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中,

$$\mathbf{b} = [b_0, b_1, \dots, b_m]^{-1}$$

$$\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_m]^{-1}$$

$$H_0 = \begin{bmatrix} h_{m+1} \\ h_{m+2} \\ \vdots \\ h_N \end{bmatrix}$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & \dots & 0 \\ h_1 & h_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_m & h_{m-1} & \dots & h_0 \end{bmatrix}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} h_m & h_{m-1} & \dots & h_1 \\ h_{m+1} & h_m & \dots & h_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N-1} & h_{N-2} & \dots & h_{N-m} \end{bmatrix}$$

通过分块矩阵可求得:

$$[\mathbf{a}] = [-H_2/H_0] \quad (25)$$

$$[\mathbf{b}] = [H_1][\mathbf{a}] \quad (26)$$

通过该系统函数极点与留数即可得出对应信号的频率及衰减因子。极点 p_i 可表示为 $p_i = -\lambda_i + j\omega_i$, λ_i 为信号衰减因子, ω_i 为对应角频率,从而可求得留数模值即为拟合信号幅值。故障电流基波衰减因子即对应角频率 ω_i 为50 Hz时的 λ_i 值。由于短路电流只是直流分量衰减,基波不衰减,而励磁涌流因暂态磁通的存在其基波呈衰减趋势,因此,可将该算法应用于断路器,对现场故障波形进行分析,区分故障电流。

相较于快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)算法,Prony算法能求得故障电流信号的基波衰减因子、相位等参数,而FFT算法仅能进行频率分析;此外,本文使用的改进Prony算法可确保在现场采样频率为6.4 kHz时识别的准确率较高。

3 多特征判别体系

3.1 判别因素

区分励磁涌流与短路电流的关键在于掌握励磁涌流的衰减特征与谐波特征。

1) 衰减特性。

本文深入分析励磁涌流衰减本质后发现,当配电变压器空载合闸时,会产生衰减的暂态磁通并与稳态磁通叠加致使铁芯饱和,由图3可知铁芯饱和后励磁电感瞬间减小,根据电感电流不能突变特性并结合三要素法分析可知,变压器产生数倍于额定电流的励磁涌流。

由式(4)可知,暂态磁通会根据电感大小呈衰减特性,每个周波磁通饱和时间都要晚于上个周波,即励磁电感处于饱和态时间要短于上个周期,相应励磁涌流“涌”的时间降低,使励磁涌流呈现衰减特征。

电力系统短路故障发生时,因电感电流不能突变,每相电流均会含有衰减的基波分量,按衰减常数衰减至零,而周期分量即直流分量则不会衰减。

2) 谐波特性。

配电变压器空载合闸时,由于励磁电感的突减

特性,会使电流波形呈现尖顶波,产生以二次谐波为主的大量谐波分量。

对式(6)励磁涌流饱和计算式进行傅里叶变换得:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} i_{\text{rush}} \cos n\theta d\theta \quad (27)$$

式中, a_n 为 n 次谐波; i_{rush} 为励磁涌流峰值; n 为谐波次数; θ 为合闸角; θ_1 为变压器到达饱和时角度; θ_2 为变压器退出饱和时的角度。当 $n=1$ 时,可求得基波与二次谐波分量幅值为

$$\begin{cases} a_1 = \frac{\Phi_s}{\pi L_s} \cdot \frac{2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 - \sin \theta_1 \cos \theta_1 - \sin \theta_2 \cos \theta_2 - \theta_2 + \theta_1}{2} \\ a_2 = \frac{\Phi_s}{\pi L_s} \cdot \frac{\sin \theta_2 - \sin \theta_1 - \sin \theta_2 \cos^2 \theta_1 + 2 \cos^2 \theta_2 \sin \theta_2}{3} \end{cases} \quad (28)$$

两者比值为

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{2(\sin \theta_2 - \sin \theta_1 - \sin \theta_2 \cos^2 \theta_1 + 2 \cos^2 \theta_2 \sin \theta_2)}{3(2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 - \sin \theta_1 \cos \theta_1 - \sin \theta_2 \cos \theta_2 - \theta_2 + \theta_1)} \quad (29)$$

由式(29)可知,变压器励磁涌流二次谐波含量与变压器进入饱和状态对应时间有关,且随着合闸角增大,进入饱和状态对应角度增大,退出饱和角度减小,二次谐波含量逐渐增加。

3.2 影响励磁涌流判别因素

由式(10)及基波衰减特性可知,当变压器合闸角接近0时,变压器会因磁通衰减导致基波衰减,此时二次谐波含量较低,而当变压器合闸角接近90°时,变压器进入饱和时间基本一致,导致基波衰减幅值较小,但变压器二次谐波含量显著增加。由于无法控制变压器合闸角大小,单种判别方式无法准确作用于保护。因此,本文将二次谐波判别法与基波衰减法综合起来,优劣互补,考虑分布式新能源接入对配电网造成谐波污染,导致短路电流中二次谐波含量在某些情况下大于传统二次谐波含量整定值的15%^[11],因此考虑将配电网总断路器整定值设为二次谐波含量为25%,多特征判别体系识别励磁涌流逻辑判断体系如图4所示。

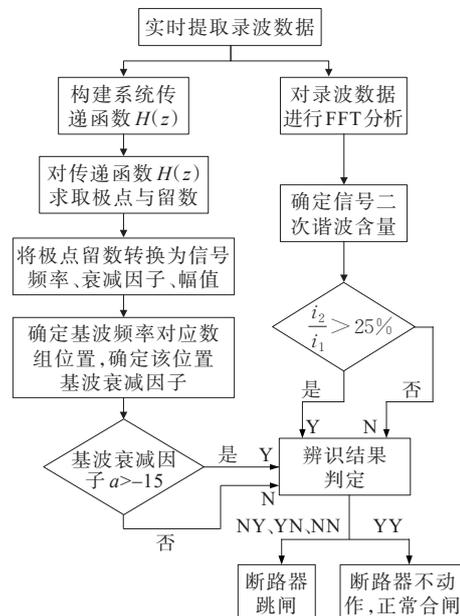


图4 多特征判别体系

Figure 4 Multi-feature discrimination system

4 算例与分析

4.1 改进 Prony 算法结果分析

在 MATLAB 中,对某现场故障电流进行仿真,使用3种 Prony 算法,加入奇异值分解-Prony 算法进行对照^[18],保持三者拟合阶数一致,得到信号各参数如表1所示。

表1 3种 Prony 算法信号参数

Table 1 Signal parameters of three Prony algorithms

方法	基波频率/ Hz	基波幅值/ A	基波衰减 因子	拟合 SNR
传统 Prony	50.512 7	194.206	-30.689 7	101.993
改进 Prony	49.930 4	213.743	-39.653 7	132.063
奇异值分解- Prony ^[13]	50.286 1	206.637	-33.715 0	113.865

由表1可知,在阶数一致的情况下,使用改进 Prony 算法拟合的曲线信噪比(signal to noise ratio, SNR)高于传统 Prony 算法,且拟合得到的基波频率也更精确。对应均方根误差曲线如图5~7所示。

对比3种 Prony 算法均方根误差发现,在现场采样频率为6.4 kHz的情况下,传统 Prony 算法在拟合前段误差较大,改进 Prony 算法拟合后段误差增大,但始终处于可接受范围,考虑继电保护的速断性,在信号拟合的前2个周期开关已经动作,后续产生的误差不影响断路器的动作。

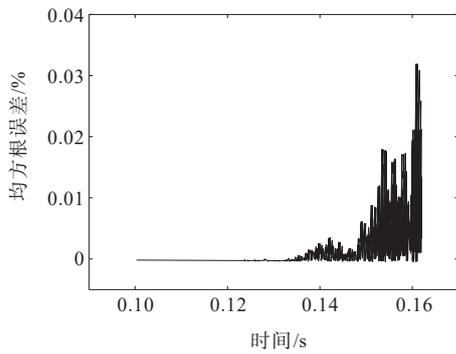


图 5 改进 Prony 算法拟合均方根误差

Figure 5 Fitted root mean square error by improved Prony algorithm

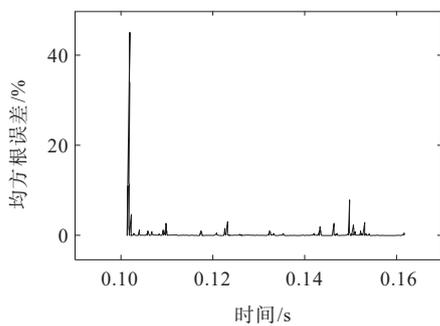


图 6 传统 Prony 算法拟合均方根误差

Figure 6 Fitted root mean square error by traditional Prony algorithm

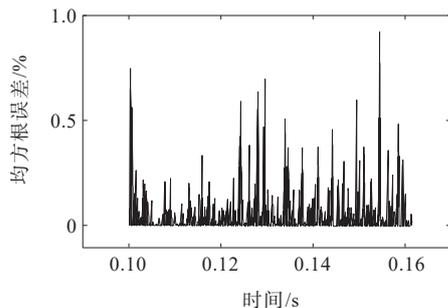


图 7 奇异值分解-Prony 算法拟合均方根误差

Figure 7 Fitted root mean square error by singular value decomposition-Prony algorithm

4.2 多特征判别体系仿真

本文通过调节断路器合闸时间来确定三相合闸角,由于变压器三相对称,励磁涌流的产生即谐波含量大小主要与合闸角有关,因此对其中一相进行仿真即可,本次仿真采用单台 D11/Y 型变压器,对不同合闸角进行仿真,所得结果如表 2 所示。

对应改进 Prony 算法拟合效果如图 8 所示。其中,实线为原始信号,虚线为一组频率、幅值、衰减因子、相位不同的正弦信号叠加组成的信号,通过将这组正弦信号与基波频率(50 Hz)求差确定基波频率在数组中的位置,从而计算出相应的基波衰减

因子。由于仅为单台变压器励磁涌流波形,“涌”的特征表现得不够明显。由单台变压器空载合闸发现,随着合闸角的增大,励磁涌流中二次谐波含量逐渐增加,而由于合闸角增大导致励磁涌流峰值减小,相应衰减因子也会减小,短路电流中二次谐波含量明显小于任意合闸角的励磁涌流,基波也几乎不衰减。当合闸角大于 75°时,若单纯采用基波衰减因子作为判据,则会因变压器进入饱和状态而时间变短,相应基波衰减因子减小,影响断路器识别,但如果采用二次谐波含量作为判据,此时系统二次谐波含量已经超过 50%,远大于短路电流含量,则不会导致误判断。

表 2 单台变压器空载合闸

Table 2 Closing of a single transformer with no load

电流类型	合闸角/(°)	二次谐波含量/%	基波衰减因子
励磁涌流	0	29.05	-7.5
	15	29.67	-7.4
	30	31.82	-7.2
	45	38.26	-7.2
	60	43.36	-6.9
	75	51.35	-6.6
短路电流	90	55.26	-6.0
		4.15	-4.1e ⁻¹¹

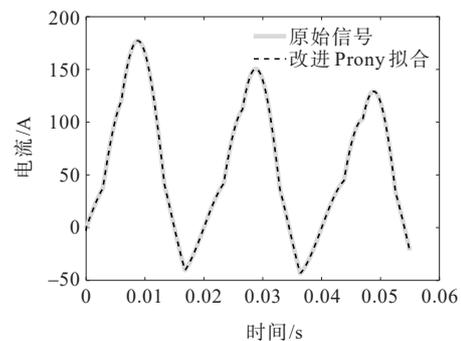


图 8 改进 Prony 算法拟合效果

Figure 8 Fitting effect of improved Prony algorithm

考虑实际配电网中变压器数量不止一台,因此在 Simulink 中建立多台变压器空载合闸模型。选取 4 台饱和参数、容量不一致的变压器进行仿真实验,仿真结果如表 3 所示。

由表 3 可知,配电网多台变压器同时空载合闸时,基波衰减因子会随着变压器数量增加而变大,但不与变压器数量成正比,由多变压器励磁磁通分析可知,多变压器空载合闸会因系统阻抗以及变压器一次阻抗的存在导致每台变压器产生的励磁磁通要小于变压器单独运行时的磁通。

表3 不同型号变压器空载合闸

Table 3 Closing of different types of transformers with no load

电流类型	合闸角/(°)	二次谐波含量/%	基波衰减因子
励磁涌流	0	36.01	-20
	15	36.64	-19
	30	38.12	-18
	45	41.10	-16
	60	43.27	-15
	75	41.19	-15
90	43.94	-8.7	
短路电流		8.41	$1.8e^{-6}$

由上述仿真分析可知,变压器空载合闸时励磁涌流二次谐波含量都保持在25%以上,基波衰减因子在单台变压器空载合闸时保持在-5以上,除多台变压器合闸角为90°外,都保持在-15以上,因此,在设计断路器时,考虑分布式新能源接入对配电网造成谐波污染,导致短路电流中二次谐波含量在某些情况下大于传统二次谐波含量整定值的15%^[11],因此考虑将配电网总断路器二次谐波含量整定值设置为25%,基波衰减因子设定为-15,只要满足上述2个条件中一个逻辑“或”时,断路器识别为励磁涌流,不进行跳闸,若两者均不满足,且电流超过系统整定值,则判定为短路电流,断路器动作。

分断路器即下级变压器数量较少时,变压器数量影响了励磁涌流产生峰值大小,导致系统基波衰减变缓,单纯依靠基波衰减因子无法准确判断励磁涌流即故障电流,因此必须采用多特征判别体系才能有效提高识别准确率。

为了验证算法的优越性,增加小波分解识别方法^[18]进行对比,对上述仿真励磁涌流信号进行db4小波分解,并从3层细节分量极值特征的角度出发进行判别。所得励磁涌流故障和短路故障CD3细节分量如图9、10所示。

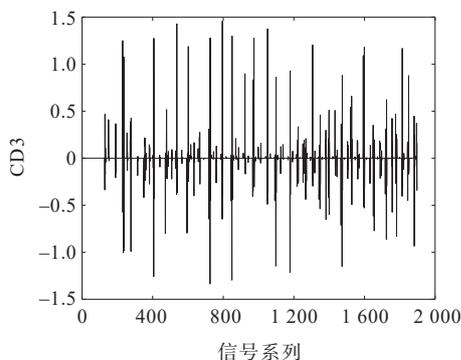


图9 励磁涌流小波db4分解CD3细节分量

Figure 9 CD3 detail components decomposed by wavelet db4 of magnetizing inrush current

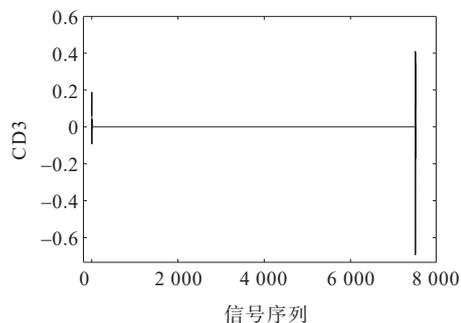


图10 短路电流小波db4分解CD3细节分量

Figure 10 CD3 detail components decomposed by wavelet db4 of short-circuit current

从图9、10可以看出,小波系数极值数量多,极值较三相短路时更大,由于励磁涌流存在时波形易出现间断角,且内部含有大量高次谐波引起的波形畸变,因此突变量对应的小波系数极值变化很大。

4.3 现场数据识别

本文对江西电网3组因励磁涌流导致断路器合闸失败的电流波形采用3种Prony算法进行拟合计算,其中,现场采样频率为6.4 kHz,求得结果如表4所示,故障波形如图11~13所示。

故障波形3由于系统合闸角较大,导致故障信号在运用改进Prony算法计算后,基波衰减因子仅为-10.7,小于设定的衰减整定值,若只使用基波衰减因子法判断,会导致断路器误动作,而多特征识

表4 现场试验波形判别结果

Table 4 Field test waveform discrimination results

故障波形	基波衰减因子			二次谐波含量/%	判别结果
	传统Prony算法	改进Prony算法	奇异值分解-Prony算法 ^[13]		
1	-22.10	-20.60	-21.90	39.09	励磁涌流
2	-0.72	-0.25	-0.42	8.19	短路电流
3	-9.90	-10.70	-9.64	48.83	励磁涌流

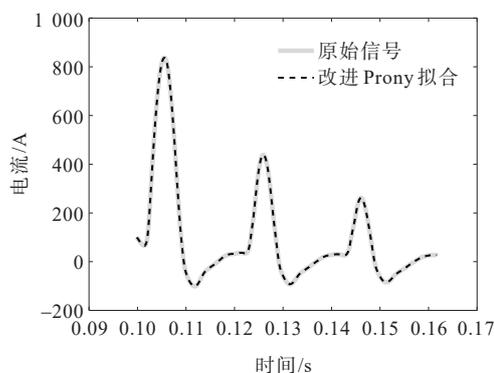


图11 故障波形1 Prony算法拟合效果

Figure 11 Fitting effect of fault waveform 1 by Prony algorithm

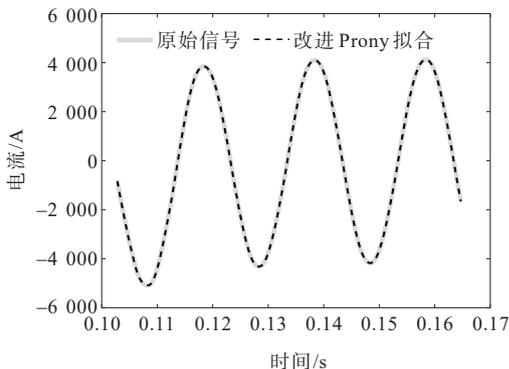


图 12 故障波形 2 Prony 拟合效果

Figure 12 Fitting effect of fault waveform 2 by Prony algorithm

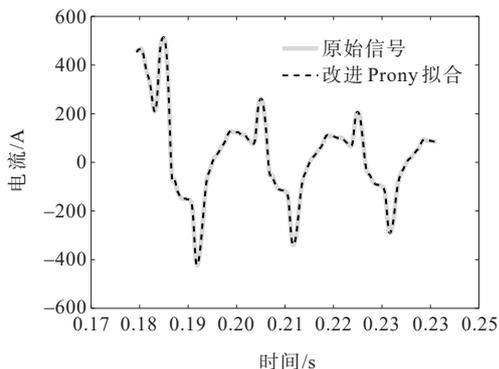


图 13 故障波形 3 Prony 拟合效果

Figure 13 Fitting effect of fault waveform 3 by Prony algorithm

别体系引入了二次谐波判据,通过傅里叶变换分析得故障信号二次谐波含量为 48.83%,远大于设定的二次谐波含量整定值 20%,可判断为励磁涌流。

为了验证多特征识别算法的优越性,将用于仿真分析的小波分解识别方法^[18]应用于实际现场波形,测试结果如图 14、15 所示。

由于现场波形的采样频率较低,通过小波分解后的 CD3 细节分量的小波系数普遍较大,且 2 类故障也无法从极值数量上进行区分,因此,该方法不适合现场励磁涌流的识别。

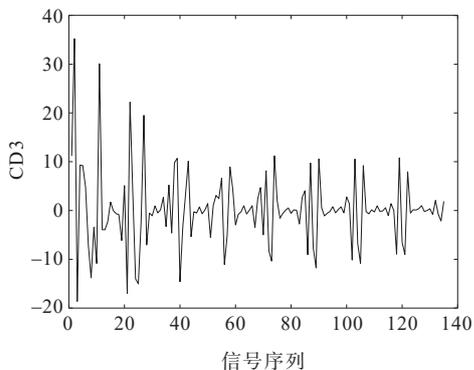


图 14 故障波形 1 小波 db4 分解 CD3 细节分量

Figure 14 CD3 detail components decomposed by wavelet db4 in fault waveform 1

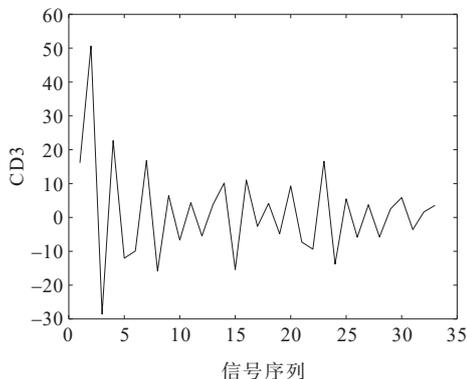


图 15 故障波形 2 小波 db4 分解 CD3 细节分量

Figure 15 CD3 detail components decomposed by wavelet db4 in fault waveform 2

5 结语

本文针对配电变压器因空载合闸产生励磁涌流导致合闸不成功的问题,提出了基波衰减因子法与二次谐波法结合的多特征综合辨识方法,并通过仿真与计算得到以下结论。

- 1) 从物理特征上分析励磁涌流衰减特性,得出励磁涌流基波衰减因子随合闸角增加而变小的特性。
- 2) 对励磁涌流计算式进行傅里叶变换后,得到其二次谐波含量与基波含量比值随合闸角增大而增大的特性。
- 3) 通过引入后向预测法,在复频域中进行拟合,有效降低了噪声对 Prony 算法的影响,提高了拟合准确度,进而增加了识别准确率。
- 4) 采用多特征综合辨识方法,弥补了单辨识方法会随合闸角变化而准确度降低的缺点。

参考文献:

[1] 甘捷,邱天友. 变压器励磁涌流产生原因及解决方法[J]. 东北电力技术,2021,42(2):44-46.
GAN Jie, QIU Tianyou. Cause and solution of transformer excitation inrush current[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(2): 44-46.

[2] 罗维求. 变压器励磁涌流成因及抑制措施[J]. 电工技术, 2020(20):90-92.
LUO Weiqiu. Cause and suppression method of transformer magnetizing inrush current[J]. Electric Engineering, 2020(20): 90-92.

[3] 李鑫,周福林,李群湛. 变压器群合闸涌流阻尼抑制方案的研究[J]. 电源技术, 2013, 37(5): 828-831.
LI Xin, ZHOU Fulin, LI Qunzhan. Study on transformer group inrush current damping suppression strategy[J].

- Chinese Journal of Power Sources,2013,37(5):828-831.
- [4] 傅伟,赵莉华,梁勇,等.多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(1):28-33.
FU Wei,ZHAO Lihua,LIANG Yong,et al.Study on no-load closing inrush current of transformer group and suppression measures[J].Power System Protection and Control,2015,43(1):28-33.
- [5] 胡海涛.变压器励磁涌流抑制措施的研究[D].淮南:安徽理工大学,2019.
HU Haitao. Research on suppression measures of transformer magnetizing inrush current[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology,2019.
- [6] 马云龙,李秀广,周秀,等.基于高压真空快速断路器的变压器励磁涌流抑制技术研究[J].高压电器,2022,58(10):136-142.
MA Yunlong,LI Xiuguang,ZHOU Xiu,et al.Research on excitation inrush current suppression technology of transformer based on high voltage vacuum fast circuit breaker[J].High Voltage Apparatus,2022,58(10):136-142.
- [7] 王伟,魏菊芳,方琼,等.变压器3种励磁涌流抑制措施效果比较[J].高压电器,2020,56(2):101-107.
WANG Wei,WEI Jufang,FANG Qiong,et al.Comparison of three kinds of magnetizing inrush current suppression measures for transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2020,56(2):101-107.
- [8] JIANG T S, CAIROLI P, RODRIGUES R, et al. Inrush current limiting for solid state devices using NTC resistor [C]//SoutheastCon.Concord,NC,USA.IEEE,2017:1-7.
- [9] 谷相宏,庞福滨,施纪栋,等.正弦波调制FOCT调制回路故障对探测器输出特性影响[J].电力工程技术,2023,42(5):232-239.
GU Xianghong,PANG Fubin,SHI Jidong,et al.Influence of sine wave modulation FOCT modulation loop fault on detector output characteristics[J].Electric Power Engineering Technology,2023,42(5):232-239.
- [10] 唐菊生.基于二次谐波制动的变压器差动保护的研究[D].淮南:安徽理工大学,2018
TANG Jusheng. Research on transformer differential protection based on second harmonic braking[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018
- [11] 郑涛,王铭灏,于吉,等.相邻变压器空载合闸对光伏输出电流二次谐波分量影响的研究[J].电网技术,2021,45(2):570-578.
ZHENG Tao,WANG Minghao,YU Ji,et al.Research on the impact of no-load closing of adjacent transformer on the second harmonic current components of photovoltaic power[J].Power System Technology,2021,45(2):570-578.
- [12] 郭成,尹轲,张艳萍,等.一种基于综合DFT和Prony算法的谐波与间谐波分析方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(17):1-9.
GUO Cheng,YIN Ke,ZHANG Yanping,et al.A harmonic and interharmonic analysis method based on integrated DFT and Prony algorithm[J].Power System Protection and Control,2021,49(17):1-9.
- [13] 张骞,边晓燕,徐鑫裕,等.基于SVD-Prony及主成分回归的次同步振荡阻尼特性影响因素研究[J].电工技术学报,2022,37(17):4364-4376.
ZHANG Qian,BIAN Xiaoyan,XU Xinyu,et al.Analysis of influencing factors on damping characteristics of subsynchronous oscillation based on singular value decomposition prony and principal component regression [J].Transactions of China Electrotechnical Society,2022, 37(17):4364-4376.
- [14] 张俊峰,陈珉,杨婷,等.低频振荡参数Prony辨识中的数字滤波器设计[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(12):99-104.
ZHANG Junfeng,CHEN Min,YANG Ting,et al.Design of digital filter for recognition of low-frequency oscillation parameters using prony algorithm[J].Proceedings of the CSU-EPSA,2018,30(12):99-104.
- [15] 徐岩,周霏霏.基于幅值特征的变压器励磁涌流和故障电流的识别[J].电网技术,2011,35(9):205-209.
XU Yan,ZHOU Feifei. A method to distinguish inrush current of power transformer from fault current based on amplitude characteristics[J].Power System Technology, 2011,35(9):205-209.
- [16] 闫富平,段建东,李笑,等.利用动态四边形分析的配电网励磁涌流识别方法[J].电网技术,2015,39(7):2017-2022.
YAN Fuping, DUAN Jiandong, LI Xiao, et al. Identification method of inrush current in distribution network based on analysis of dynamic quadrilateral[J].Power System Technology,2015,39(7):2017-2022.
- [17] KUMARESAN R, TUFTS D. Estimating the parameters of exponentially damped sinusoids and pole-zero modeling in noise[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1982,30(6):833-840.
- [18] BABAEI Z, MORADI M. Novel method for discrimination of transformers faults from magnetizing inrush currents using wavelet transform[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering,2021,45(3):803-813.