An Integrity Detection Method of Rectifier High Speed Signal Based on Ant Lion Algorithm^{*}

TANG Sijun^{1*}, LI Yuanbin²

(1.Electronic Information and Artificial Intelligence College, Yibin Vocational and Technical College, Yibin Sichuan 644000, China;
 2.School of Information Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an Sichuan 625014, China)

Abstract: The reflection and crosstalk of rectifier high-speed signal affect the normal operation of the whole electrical system. An integrity detection method of high-speed signal based on ant lion algorithm is proposed. Ant lion algorithm is used to calculate the resistance in the rectifier to obtain the characteristic impedance. The effective length of the rectifier signal is obtained to determine the high-speed signal on the transmission line. The impedance of the transmission line and the transmission impedance of the interconnection line are used to form a voltage divider, and the incident wave on the interconnection line is the incident voltage of the driver. The reflection voltage of the load end having impedance mutation is measuved. The ratio of the two is the reflection fault of high-speed signal. The ant lion algorithm is used to analyze the interaction between the magnetic field edge and the signal electric field when the adjacent transmission lines are close. When the energy coupling between the transmission lines is determined as crosstalk, the zero forcing matrix is used to realize linear weighting, and all components of the weighted received signal vector are obtained. The signal integrity detection is realized by the least square criterion. The validity of the integrity detection method of high-speed signal is verified by experiments. The results show that the proposed method can detect the high-speed signal fluctuation of rectifier in time with strong real-time performance and high integrity. **Key words**: ant lion algorithm; rectifier high speed signal; reflection and crosstalk; transmission line; signal detection; computer simulation experiment

EEACC:1210 doi:10.3969/j.issn.1005-9490.2022.04.013

基于蚁狮算法的整流器高速信号完整性检测方法*

唐思均^{1*},李源彬²

(1.宜宾职业技术学院电子信息与人工智能学院,四川 宜宾 644000;2.四川农业大学信息工程学院,四川 雅安 625014)

摘 要:针对整流器高速信号发生反射、串扰影响整体电气系统正常运行的问题,提出了基于蚁狮算法的整流器高速信号完整性检测方法。利用蚁狮算法计算整流器内的电阻值以获取特征阻抗;获得整流器信号的有效长度,确定传输线上高速信号;采用传输线阻抗和互连线传输阻抗形成分压,互连线上入射波为驱动器入射电压;采集负载端发生阻抗突变的反射电压, 二者比值即为高速信号的反射故障;通过蚁狮算法分析相邻传输线接近时磁场边缘与信号电场的相互影响,当传输线间产生的能量耦合确定为串扰时,凭借迫零矩阵实现线性加权,获得加权接收信号向量的所有分量,通过最小二乘法准则实现信号完整性检测。通过实验验证整流器高速信号完整性检测方法的有效性。结果表明,所提方法能够及时检测出整流器高速信号波动,实时性强,完整度高。

关键词:蚁狮算法;整流器高速信号;反射与串扰;传输线;信号检测;计算机仿真实验

中图分类号:TN495;TM461 文献标识码:A

文章编号:1005-9490(2022)04-0838-05

整流器是一种能够改变交、直流电的装置,能够 为电气电路提供电能和无线电信号的侦测等。因为 它被广泛地应用于各种各样的整流电源内,所以需 要转变的电压也从几十至几千伏、电流从几安至几 千安不等。将整流器应用在高速电路中时,它的信 号完整性非常重要。通过检测信号传输路径质量,

项目来源:国家自然科学基金资助项目(60373110,60573130,60502011);863 项目;教育部新世纪优秀人才计划资助项目 (NCET-04-0870);四川省应用基础研究计划资助项目(05JY029-021-1)

能够确定整流器信号的完整性是否良好。传输路径 不仅是电路的连接金属线,还可以是整体电气元件, 同时也可以是一些其他的媒质^[1-2]。整流器高速信 号的反射、串扰问题始终影响信号完整性检测效果, 相关学者对此问题进行了研究,取得了一定的进展。

陈涛等人^[3]提出一种双重化脉冲整流器多管 开路故障快速诊断方法,通过 StarSim 软件获取整流 器电压变化,利用原型控制器分析门极信号突变情 况,实现整流器多管开路故障快速诊断,此方法能够 提升故障定位准确率,避免负载扰动影响。王英等 人^[4]提出基于改进谱峭度与电流均值的牵引整流 器开路故障诊断方法,利用 IGBT 开路计算电流均 值,利用电流突变特征获取整流器故障类别,依据改 进谱峭度实现整流器开路故障诊断。此方法能够获 取较高的故障诊断准确率,但是诊断过程比较复杂, 诊断效果较高。

高速信号如果不完整性,并不是某种单一因素 造成的,而是整体系统内,通过多种不同因素所导致 的。若信号不能正常响应,就不能让系统长期处于 稳定的状态下进行工作,这时会发生信号完整性缺 失问题^[2]。而本文提出的基于蚁狮算法的整流器 高速信号完整性检测方法,通过模拟蚁狮生物的行 为生态,计算整流器内电阻值,通过置零整流器内的 串扰以及反射系数,得到整流器内所接收信号向量 的所有分量,从而明确整流器内高速信号是否完整。

1 蚁狮算法数据分析

整流器高速信号的不完整,会导致整体电路不能稳定地工作,而蚁狮算法作为一种启发式优化方法,极为适用非凸优化问题,可不断迭代搜索整流器内各信号信息。蚁狮在沙子表面挖好洞穴以后,坐等猎物出现。制作的陷阱形状能够影响到猎物捕捉,使其无法从洞口爬出,同时,便于下次捕捉,计算蚂蚁掉落陷阱的过程即计算整流器内真实信号和干扰数据的过程^[3]。

(1)蚂蚁的随机行动分析

具体蚂蚁行动建模公式为:

$$X(t) = [0, S(2r(t_1) - 1), S(2r(t_2) - 1)], \cdots, S(2r(t_n) - 1)]$$
(1)

式中:n 代表最大迭代的个数,S 代表累积和,t 代表 迭代的步长,r(t)代表随机的函数,具体公式为:

$$r(t) = \begin{cases} 1 & \text{rand} > 0.5\\ 0 & \text{rand} \le 0.5 \end{cases}$$
(2)

式中:rand 代表服从[0,1]内均匀分布的随机数。

蚂蚁行动位置是随机的,所以随机行走要对其归 一化处理,方便搜索空间中寻求最佳解。具体公式为:

$$X_{i}^{t} = \frac{(X_{i}^{t} - a_{i}) \cdot (d_{i} - M_{i}^{t})}{d_{i}^{t} - a_{i}} + M_{i}$$
(3)

式中:*a_i* 以及 *d_i* 代表第 *i* 个变量最小以及最大随机的步数。*Mⁱ* 以及 *dⁱ* 分别代表第 *t* 次迭代的第 *i* 个变量最小以及最大值。

(2)蚂蚁行动到陷阱

蚂蚁随机行动至陷阱位置,或受到陷阱位置的 蚁狮 M 以及 d 向量控制,具体公式为:

$$M_i^t = A_j^t + M^t \tag{4}$$

$$d_i^t = A_j^t + d^t \tag{5}$$

式中:A¦代表第j个蚁狮处于t迭代时的区域。

(3)满意滑落陷阱^[4]

蚂蚁一旦滑落陷阱,这时蚁狮会从洞口的中心 位置对外抛沙,从而使蚂蚁滑至洞底,使蚂蚁的随机 行走半径降低,具体公式为:

$$M^{t} = \frac{M^{t}}{I} \tag{6}$$

$$d^{i} = \frac{d^{i}}{I} \tag{7}$$

$$I = 10^{\omega} \times \frac{t}{T} \tag{8}$$

式中:t以及 T 代表目前迭代次数以及最大的迭代 次数。 ω代表与目前迭代次数所相关常数值。

(4)更新陷阱

在蚁狮捕捉猎物后会在沙子下方食用猎物,而适 应能力较强的蚁狮能够捕捉的猎物会更多,这就说明 蚁狮捕捉完猎物后,要更新下个陷阱,具体公式为:

$$A_{j}^{t+1} = \{A_{j}^{t+1} | f(A_{j}^{t+1}) \ge f(A_{j}^{t}) \}$$
(9)

(5)蚁狮精英的选取

蚁狮精英的定义,是每次更新陷阱在最优区域 的蚁狮,就是适应蚁狮,在每一次迭代的过程内,会 影响蚁狮行为,具体公式为:

$$A_{j}^{\prime} = \frac{R_{A}^{\prime} + R_{E}^{\prime}}{2} \tag{10}$$

式中: R_A^t 以及 R_E^t 分别代表选取蚁狮随机行为和 t 次迭代的精英行为,也就是整流器内选取的随机信 号以及经过 t 次迭代处理后得到的真实信号^[5]。

2 整流器高速信号的完整性检测

2.1 整流器的高速信号传输线分析

将整流器内各参数代入蚁狮算法中,计算整流器内电阻值,从而获得整流器内真实的特征阻抗 Z₀,设置点 P 作为整流器中任意的一个点。C₁、L₁、 *R*₁分别代表等效电容、电感、电阻。*R*₂代表漏电流 所体现出电阻,该阻值接近无限大。而传输线的静态电阻*R*₁非常小,基本忽略不计,具体公式为:

$$Z_0 = (L_1/C_1)^{1/2} \tag{11}$$

该情况的特征阻抗是无损阻抗。某个信号 10%~90%上升以及下降的时间是 *T*,,那么此信号 在整流器内的走线延迟是 *D*,此信号的有效长度是 *L*,具体公式为:

$$L = T_r / D \tag{12}$$

信号处于导线上的传输端比 L/6 大时,要采用 传输线理论。这就说明在传输距离至一定程度时, 才能够采用传输线理论,反之,认定此段线路上仅为 一个点,将该信号当成普通信号进行处理^[6]。

2.2 高速信号的完整性分析

高速信号的完整性,是作为整体系统的可靠性 保障,因为高速信号内含有较高的频率,系统电气参 数变化较大,出现许多高速信号的特有状况,其中包 含:串扰、发射等^[7]。

2.2.1 发射产生机制

实际传输线驱动器的输出阻抗并不是0,互连 线传输与阻抗会形成分压器,而在互连线上的入射 波,是驱动器电压的部分,具体公式为:

$$V_{\rm inc} = V_s \cdot \frac{z_0}{z_0 + R_s} \tag{13}$$

式中: V_{inc} 代表入射电压, V_s 代表驱动器内的电压, R_s 代表驱动器的内阻, z_0 代表互连线的阻抗^[8]。

在高速信号能够传输至负载端上或是任意阻抗 的突变区域时,分界面的电流以及电压会以连续的 形式构成。而对于阻抗分界面的两侧,存在 $V_1 = V_2$, $I_1 = I_2$, 且 $V_1/I_1 = Z_1$, $V_2/I_2 = Z_2$,因此在阻抗产生突变 时,就是 $Z_1 \neq Z_2$ 时,那么5个等式不会同时成立,而 为了令系统保持整体平衡,要在分界面位置生成反 射回源端电压^[9]。

在入射电压 V_{inc} 通过互连线进行传输,直到负载端时,由于阻抗突变情况,会生成反射电压 V_{reft} ,这时的传输电压 V_{trans} 则会继续向前传播,而分界面的两侧电压则要满足公式为:

$$V_{\rm inc} + V_{\rm refl} = V_{\rm trans} \tag{14}$$

相同的是,分界面两侧的电流要满足条件具体 公式为:

$$I_{\rm inc} - I_{\rm refl} = I_{\rm trans}$$
(15)

分界面两侧的电压以及电流,需要满足的关系 公式,分别为:

$$\frac{V_{\rm inc}}{I_{\rm inc}} = Z_0 \tag{16}$$

$$\frac{V_{\text{refl}}}{I_{\text{refl}}} = Z_0 \tag{17}$$

$$\frac{V_{\text{trans}}}{I_{\text{trans}}} = R_L \tag{18}$$

把式(16)、式(17)以及式(18)代入式(15)内, 具体可以得到公式为:

$$\frac{V_{\rm inc}}{Z_0} - \frac{V_{\rm refl}}{Z_0} = \frac{V_{\rm trans}}{R_L}$$
(19)

将(14)代入式(19)内,取消 V_{trans}且进行整理获得公式为:

$$\rho = \frac{V_{\text{refl}}}{V_{\text{inc}}} = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0} \tag{20}$$

可将入射电压和发射电压比,定义成反射系数, 这时就能够求出传输系数,具体公式为:

$$\tau = \frac{V_{\text{trans}}}{V_{\text{inc}}} = \frac{2R_L}{R_L + Z_0} \tag{21}$$

2.2.2 串扰产生机制

2.2.2.1 容性串扰

设置 c_m 代表单位长度互容,是沿着两条传输线进 行分布的,在两条导线距离足够近的时候,电容会变得 非常大,且令攻击线的耦合能量影响到受害线^[10]。

在传输线中间截取一段 Δx,而高速信号的上升 沿在经过该段时,将位移电流注入受害线内。能够 获得公式为:

$$\frac{V_b}{Z_0} + \frac{V_f}{Z_0} = C_m \Delta x \frac{\mathrm{d}V_s}{\mathrm{d}t} = c_m \Delta x \frac{\Delta v}{T_r}$$
(22)

式中: Δx 代表驱动波形的幅度, T_{ℓ} 代表波形上升的时间,通过电压连续性可以获得 V_{ℓ} = V_{ℓ} ,具体公式为:

$$V_b = V_f = \frac{1}{2} Z_0 c_m \Delta x \, \frac{\Delta v}{T_r} \tag{23}$$

因为前向串扰传播的方向以及速度和信号自身的相同,在受害线中的所有点前向串扰相加,而且要在相同的时间内抵达远端。通过式(23)能够获得, 长度是 V_{EE}传输线,处于远端总噪声公式为:

$$V_{\rm FE} = \frac{1}{2} Z_0 c_m d \frac{\Delta v}{T_r} \tag{24}$$

信号上升时间是 T_r 一半。式(23)内距离为 $\Delta x = V_p \frac{1}{2} T_r$, V_p 代表相速度,将其代入至式(23),获 得近端的噪声公式为:

$$V_{\rm NE} = \frac{1}{4} Z_0 c_m v_p \Delta x \tag{25}$$

在 $Z_0 V_p = \sqrt{\frac{l}{c}} / \sqrt{lc} = 1/c$ 内,其中, c 代表传输

线的单位长度电容值,可以得到:

$$V_{\rm NE} = \frac{1}{4} \frac{c_m}{c} \Delta v \tag{26}$$

根据上述过程可知,信号串扰能够影响电容值 与脉冲信号时宽,而且远端以及近端脉冲的极性全 是正向的。

2.2.2.2 感性串扰

截取传输线中的一段,这时攻击线经过电流,互 感线路会感受到串联电压,获得串联电压的计算公 式为:

$$V_b = l_m \Delta x \, \frac{\mathrm{d}i_r}{\mathrm{d}t} + v_f \tag{27}$$

因为电流的连续性,所以 $\frac{V_b}{Z_0} = -\frac{v_f}{Z_0}$,在清除掉 v_f

且利用 $i_s = \frac{v_s}{Z_0}$ 进行替换之后,能够获得后向波幅度公式为:

$$V_b = \frac{1}{2} \frac{l_m}{Z_0} \Delta x \frac{\mathrm{d}v_s}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{2} \frac{l_m}{Z_0} \Delta x \frac{\Delta v}{T_r}$$
(28)

同理可得,前向波幅度具体公式为:

$$v_f = \frac{1}{2} \frac{l_m}{Z_0} \Delta x \frac{\Delta v}{T_r}$$
(29)

上述两种串扰的推导方法基本相同,其中,感性 耦合能够随攻击信号上升沿持续传播,而在相同的 时间内会抵达至远端,此时攻击信号传播的方向则 会与反向串扰位于相反状态,进而生成积累噪声的 幅度,具体公式为:

$$V_{\rm FE} = \frac{1}{2} \frac{l_m}{Z_0} d \frac{\Delta v}{T_r}$$
(30)

$$V_{\rm NE} = \frac{1}{4} \frac{l_m}{l} \Delta v \tag{31}$$

感性串扰处于近端以及远端的波形上,与容性 串扰的机制类似。

2.2.2.3 总串扰

通常情况下,感性串扰和容性串扰在同一时间 出现,将式(26)和式(31)相加,能够获得近端串扰 公式:

$$V_{\rm NE} = \frac{1}{4} \left(\frac{c_m}{c} + \frac{l_m}{l} \right) \Delta x \tag{32}$$

将式(24)和式(30)相加,能够获得远端串扰 公式:

$$V_{\rm FE} = \frac{1}{2} d \left(Z_0 c_m - \frac{l_m}{Z_0} \right) \frac{\Delta v}{T_r}$$
(33)

通过上述公式能够看出,近端串扰是一直存在 的,无法清除。而远端串扰,由于二者的串扰极性相 反,所以会相互抵消一部分,而当 $Z_0 c_m - \frac{l_m}{Z_0} = 0$ 时,则 会全部抵消,而实际的整流器,不会存在理想状态, 所以远端串扰无法清除^[11]。

2.3 信号检测方法

通过强制将整流器信道串扰以及反射进行干扰 置零。通过迫零矩阵实现线性加权,处理高速信号 的向量,再对加权后接受信号向量所有分量进行检 测,获取发射符号的向量。

利用最小二乘法准则,对噪声误差 e² 定义,具体可得到公式为:

$$e^{2} = [(y - Hx)^{H}(y - Hx)] = n^{H}n \qquad (34)$$

求导上式,令一阶导数是0,二阶导数比0大, 以此能够获得 e²极小值估计,从而获得高速信号迫 零矩阵公式为:

$$F = (H^{H}H)^{-1}H^{H} = H^{+}$$
(35)

式中:H⁺代表已知信道矩阵 H 广义的逆矩阵。

利用 F 左乘接收信号的向量 y,能够获得利用 此迫零方法估计接收高速信号的向量,具体公式为:

$$\tilde{y} = Fy = H^+ y = x + H^+ n \tag{36}$$

利用式(34)确认估计矩阵 *F*,能够完全去掉 *y* 内发射向量的所有分量间互相干扰。以此可以完成 高速信号的完整性检测^[12]。

3 实验仿真证明

3.1 实验1

实验环境选择 CPU 为 2.3GHz、内存为 4GB、操 作系统为 Window10,直流母线的电压是 220 V、帧数 为 2 000 帧、发射功率为 1、开关的频率是 1.75 kHz 的三相量电平的 PWM(Pulse width modulation)整流 器系统进行实验,该整流器的高速信号为周期性的, 在脉冲为线性的调频信号。具体整流器的高速信号 幅值变化曲线如图 1 所示。

从图1能够看出,在一定时间内,整流器的高速 信号幅值呈周期变化。本文方法与实际信号幅值变



化情况基本一致,而双重化脉冲方法的整流器高速 信号幅值变化明显落后于实际情况,表明本文方法 进行整流器高速信号完整性检测时的实时性更好。 这是因为引入蚁狮算法,确定传输线间的能量耦合 串扰,获得加权接收信号向量的所有分量,使得检测 过程中即使出现冗余干扰也能不断迭代搜索最优 解,可靠性高。

3.2 实验2

为了进一步证明本文检测方法的效果,将该信 号通过人为的方式进行外界干扰,使其发生轻微故 障,然后采用本文方法,对其进行检测,验证高速信 号是否完整。具体如图2所示:





通过观察图 2 能够看出,随着运行时间的增加, 不同方法下高速信号完整度随之变化。当运行时间 为2s时,双重化脉冲方法的高速信号完整度为79%, 改进谱峭度的高速信号完整度为73%,本文方法的高 速信号完整度为97%。当运行时间为8s时,双重化 脉冲方法的高速信号完整度为73%,改进谱峭度的高 速信号完整度为74%,本文方法的高速信号完整度为 98%,说明本文方法能够获得完整的高速信号。这是 因为本文引入了蚁狮算法分析相邻传输线接近时磁 场边缘与信号电场的相互影响,准确计算整流器内的 电阻值以获取特征阻抗,实现不同频域的干扰信号对 消,减少了高速信号传输完整性检测干扰因素,使得 高速信号的完整度得到提升。

4 结论

本文提出基于蚁狮算法的整流器高速信号完整 性检测方法,通过置零反射系数以及串扰系数,使用 迫零矩阵完成线性加权,处理高速信号的向量,通过 加权后接受信号向量的所有分量,实现信号检测,不 过由于整流器造成信号不完整的方式有很多,所以 本文还需要进一步努力,研究其他造成信号不完整 的原因,从而完成检测。

参考文献:

- [1] 邵庆祝,谢民,王同文,等. 基于蚁狮算法的含分布式电源配网 过电流保护配合优化[J]. 电子器件,2020,43(6):1330-1334.
- [2] 聂金铜,赵争鸣,袁立强,等.级联恒功率负载情况下三相并网 PWM 整流器基于 TS 模糊模型的稳定性分析[J].电网技术, 2020,44(5):1931-1943.
- [3] 陈涛,刘志刚,胡轲珽,等. 一种双重化脉冲整流器多管开路故 障快速诊断方法[J]. 电工技术学报,2020,35(10):2226-2238.
- [4] 王英,王丹,陈小强,等.基于改进谱峭度与电流均值的牵引整 流器开路故障诊断方法[J].电力自动化设备,2020,40(1): 112-118.
- [5] 袁义生,陈旭,毛凯翔. 基于纹波电压前馈的级联 H 桥整流器 输出电压平衡策略[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(2): 9-17.
- [6] 熊成林,宋智威,黄路,等. 基于谐波补偿的单相 PWM 整流器 虚拟磁链模型预测算法[J]. 电机与控制学报,2020,24(11): 93-101.
- [7] 彭惠薪,李哲,郑宏超,等.基于差频检测技术的高速 AD 单粒
 子翻转评估方法研究[J].原子能科学技术,2020,54(5): 857-862.
- [8] 苏兴矩,陈礼彪,卢兴利,等. 基于谱能分析法的隧道仰拱质量 检测技术[J].地下空间与工程学报,2020,16(S1):232-235,246.
- [9] Gazivoda M, Trigona C, Bilas V. Weak Signal Detection Utilizing a Mechanically Switched Inductor[C]//2019 IEEE 8th International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI), Otranto, Italy, IEEE, 2019:215–220.
- [10] Yang C C, Li D Y, Huang T H. 2.4 GHz RF Energy Harvesting Rectifier Chip with Harmonic Backscattering Detection Capability [C]//2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Singapore, IEEE, 2019:1688-1690.
- [11] 全英汇,高霞,沙明辉,等. 基于期望最大化算法的捷变频联合 正交频分复用雷达高速多目标参数估计[J]. 电子与信息学 报,2020,42(7):1611-1618.
- [12] Sombune P, Phienphanich P, Phuechpanpaisal S, et al. Automated Embolic Signal Detection Using Deep Convolutional Neural Network [C]//The 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'17). Jeju, South Korea, IEEE, 2017: 3365–3368.



唐思均(1980—),男,汉族,四川宜宾 人,计算机科学与技术硕士,讲师,研究 方向:计算机网络技术。