論文99-36T-3-6

Chrestenson 함수를 이용한 MVL 회로의 스펙트럴 분석에 관한 연구

(A Study on the Spectral Analysis of Multiple Valued Logic Circuits using Chrestenson Function)

金 鍾 五 *, 申 平 浩 *

(Jong-O Kim and Pyun-Ho Shin)

요 약

함수영역의 데이터를 스펙트럴영역 데이터로 변환시켜주는 스펙트럴 계수를 통해 논리함수의 분석을 할 수 있다. 본 논문에서는 스펙트럴 기술을 통해 MVL 회로에 대해 분석을 수행하였고, MVL 회로의 고장분석 및 검출방법을 제안하였다.

Abstract

The analysis of logic function is performed by the spectral coefficients which transform the function domain data into the spectral domain data. By using the spectral techniques, analysis of MVL circuits is performaed, and the fault analysis and detecting methods of multiple-valued logic circuits are proposed in this paper.

I. 서 론

함수영역의 데이터는 논리회로를 분석하는데 있어서 정확한 모델을 제공해주므로 논리함수의 분석, 합성, 설계에 관한 방법들은 대부분 함수영역의 데이터를 이용하고 있다. 논리함수의 동작은 입력변수에 대한 함수 f(X)에 의하여 표현되며 편의상 진리표로 정의된다. 진리표에서 각 행은 입력변수의 조합 중 하나를 나타내며 이에 대한 함수의 동작을 정확히 표현하지만 그 이외의 동작은 고려되지 않는 성질을 갖고 있다. 따라서 함수의 동작에 대한 완전한 정의는 진리표의 모든 행을 조합하므로서 가능해진다. 그러나 함수 동작에 대한 다른 표현을 이용하여 함수 전체의 정보를 제공할 수가 있다. 이러한 표현은 함수영역의 데이터를 적절히 변환하여 얻어지며 본래 함수가 갖는 정보를 손실 없이 표현할 수 있어야 한다. 즉 역변환으로 원래 정보를 복구할 수 있어야 하는 성질을 가져야 한다. 스펙트럴영역의 데이터가 갖는 값의 의미는 함수 f(X)와 변환행렬의 行에 해당되는 표준함수들과의 상관관계를 나타내므로 전체 함수에 대하여 전역(global) 정보를 제공해 준다.

이러한 전역적인 정보는 논리함수의 분류, 합성, 설계, 고장검출, 코딩 이론, 패턴 분석등 일부 응용 분야에서 함수영역의 데이타 보다 훨씬 유용하게 사용되고 있다. 조합회로의 고장 테스트에서 가장 널리 사용되는 방법은, 고장의 종류에 따라 회로의 동작을 검증하기 위한 테스트 벡터를 이용하는 방법이다. 이 방법은 각각의 테스트 벡터에 대해서 정상회로의 출력 데이터와 테스트 대상회로에서 얻은 데이터를 저장하기 위한 메모리가 요구된다. 또한 각 고장을 검출하기 위한 적절한 테스트 벡터의 생성에 많은 계산 시간을 필요로

* 正會員, 東洋工業專門大學 電氣電子通信工學部 (School of Electrical Engineering, Dongyang Technical College)

※ 이 논문은 1998년도 동양공업전문대학 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

接受日字: 1999年2月24日, 수정완료일: 1999年3月23日

한다. 특히 이 같은 메모리와 계산시간은 회로의 크기 및 로직 레벨의 수가 증가함에 따라 지수적으로 커지게 된다. 반면, 스펙트럴 방법에 의한 테스트 방법은 테스트 벡터가 필요치 않고, 하드웨어의 추가가 많지 않기 때문에, 테스트 내장형 설계에 용이하여 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있다[1,2]. MVL 회로의 고장검출에 대한 주요 연구를 살펴보면 다음과 같다. Y.M. Ajabnoor와 Abd-El barr[3]는 Logic Difference 방법을 이용하여 내부선 및 주입력에서의 *stuck -at* 형태의 고장검출을 위한 테스트 벡터 구성에 관한 연구를 제안하였고, H.Y. Lo와 S.C. Lee[4]는 K-map 방법과 Path-sensitization 방법을 확장하여, 단일 및 내부선의 stuck-at 고장에 대한 검출 방법을 제시하였다. 또한 H. Lu 와 S.C. Lee[5]는 Boolean Difference를 확장한, Partial M-difference를 정의하여 입력 및 내부선의 고장 모델에 대한 테스트 벡터 방법을 제안하였다. 또한 T. Damarla[6]는 Reed-Muller 계수를 이용한 검출 방법을 제안하여 stuck-at 및 bridging 고장에 대한 검출 방법에 대한 연구를 수행하였으나, 이 방법 역시 특정 고장을 위한 테스트 벡터 구성을 하여야 한다. 이 같은 문제점을 해결하기 위해서, 본 논문에서는 MVL 함수에 대한 고장분석[7,8]을 위해 Chrestenson 함수[9,10,11]의 스펙트럴 계수를 이용하여, 다치 논리함수에서의 고장에 대한 검출 조건을 제시하였다. 본 논문의 구성은 II장에서 MVL 함수의 스펙트럼, III장에서는 스펙트럼 분석을 통한 MVL 회로해석 예로서, 여러 고장에 대해 스펙트럴 계수를 이용한 고장검출방법에 대해 분석하였다. IV장은 고장검출을 위한 스펙트럴 계수에 관해 비교하였고, V장 결론 순으로 되어있다.

II. MVL 함수의 스펙트럼 개요

MVL 함수 f는 사상(mapping) f : $L^n \rightarrow L$로 정의된다. 여기서 L은 p치 논리 시스템인 경우의 논리값의 유한집합으로 L= { 0, 1, 2 · · · p-1 }이다. MVL 함수의 모든 입력 원소의 집합을 $x = (x_n, x_{n-1}, \cdot\cdot\cdot, x_2, x_1)$이라 하면 MVL 함수는 $f(x_n, x_{n-1}, \cdot\cdot\cdot, x_2, x_1)$으로 표기한다. ι의 다치확장을 $(v_n, v_{n-1}, \cdot\cdot\cdot, v_2, v_1)$이라 하면, $x_i = v_i\ (1 \le i \le n)$에 대한 $f(v)$의 스펙트럼 $s_0, s_1, \cdot\cdot\cdot, s_q\ (q = p^n - 1)$는 다음 식으로 정의된다.[1,2]

$$s_w = \sum_{v=0}^{q} \overline{t_w}(v)\, y(v) \tag{1}$$

여기서

$$y(v) = a^{f(v)},$$

$$t_w(v) = a^{ch(w,v)},$$

$$a = \exp(-j\frac{2\pi}{p}),\quad j = \sqrt{-1}$$

$$ch(w,v) = \sum_{i=1}^{n} w_i v_i,$$

$$w = \sum_{i=1}^{n} w_i p^{i-1},\quad v = \sum_{i=1}^{n} v_i p^{i-1}$$

식 (1)에서 $t_w(v)$는 Chrestenson 함수가 된다. 식 (1)로 부터 y(w)를 구하면 다음과 같다.

$$y(w) = \frac{1}{p^n} \sum_{v=0}^{q} t_w(v)\, s_v \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)를 행렬로 표현하면, v번째 원소가 $y(v)$인 열 벡터 Y와 w번째 원소가 s_w인 열 벡터 S가 된다. Tn 행렬은 w 번째 행과 v 번째 열의 원소가 tw(v)인 $p^n \times p^n$인 행렬이 된다. 식 (1)과 식 (2)의 행렬 표현은 다음과 같다.

$$[\ \overline{T_p^n}\ ]Y\ ] = S \tag{3}$$

$$[\ Y\ \ ] = \frac{1}{p^n}[\ T_p^n\ \ ]\ S\ ] \tag{4}$$

T^n행렬은 직교, 대칭하기 때문에 $T^{n'} = T^n$, $(T^n)^{-1} = \frac{1}{p^n}\overline{T^n}$ 이 된다. 단, $\overline{T^n}$은 T^n의 공액 복소행렬이다.

주어진 함수 f(x)를 Shannon 분해 방식으로 분해할 경우, 함수 f(x)의 스펙트럼과 부분함수의 스펙트럼 사이에는 다음과 같은 관계를 갖는다. 이때 S와 Y는 p^{n-m}개의 같은 크기의 부분벡터로 분해된다.

$$f_u(x_1, x_2, \cdots, x_m) = f(x_1, x_2, \cdots, x_m, u_1, u_2, \cdots, u_{n-m}) \tag{5}$$

여기서, $0 \le u \le p^{n-m} - 1$, $u = \sum_{i=1}^{n-m} u_i p^{i-1}$이다.

$$S = \begin{bmatrix} S^0 \\ S^1 \\ S^2 \\ \vdots \\ S^\beta \end{bmatrix}, \ Y = \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_\beta \end{bmatrix}, \ \beta = p^{n-m}-1 \qquad (6)$$

$$[S^0 \ \ S^1 \cdots \ \ S^\beta \,] = [S_0 \ \ S_1 \cdots \ \ S_\beta \,] \ \overline{T_p^{n-m}} \qquad (7)$$

$$[S_0 \ \ S_1 \ \cdots \ \ S_\beta] = \frac{1}{p^{n-m}}[S^0 \ \ S^1 \cdots \ \ S^\beta \,] \ T_p^{n-m} \qquad (8)$$

함수 f의 스펙트럼 S의 i째 부분벡터 S^i와 부분함수 f_i의 스펙트럼 S_i는 각각 식 (9)와 식(10)과 같이 유도된다.

$$S^i = [\ S_0 \ S_1 \cdots S_\beta \ ] \ \overline{T_{p*i}^{n-m}} \qquad (9)$$

$$S_i = (\frac{1}{p^{n-m}})[\ S^0 \ S^1 \cdots S^\beta \ ] \ T_{p*i}^{n-m} \qquad (10)$$

따라서, 부분벡터 S^i의 j번째 원소 s_j^i와 부분함수의 스펙트럼 S_i의 j번째 원소 s_{ij}는 각각 다음 식과 같게 된다.

$$s_j^i = \sum_{k=0}^{\beta} \overline{t_{ki}^{n-m}} \ s_{kj} \qquad (11)$$

$$s_{ij} = (\frac{1}{p^{n-m}})\sum_{k=0}^{\beta} t_{ki}^{n-m} \quad s_j^k \qquad (12)$$

여기서, $\overline{T_{p*i}^{n-m}}$과 T_{p*i}^{n-m}은 각각 $\overline{T_p^{n-m}}$과 T_p^{n-m} 행렬의 i열이다.

단, $0 \le i, \ \beta \le p^{n-m}-1, \ \ 0 \le j \le p^m-1$ 이다.

Ⅲ. 스펙트럼 분석을 통한 MVL 회로해석

함수영역의 데이터는 논리회로를 분석하는데 있어서 정확한 모델을 제공해주므로 논리함수의 분석, 합성, 설계에 관한 방법들은 대부분 함수영역의 데이터를 이용하고 있다. MVL 회로에 대한 스펙트럼 분석을 통해 회로 고장에 대해 적용해 보기로 한다.

함수 f(x)를 구현하는 다치 논리회로에서, 영구적인 고장으로 인해 f(x)와 다른 고장 함수 $f^*(x)$로 동작되는 장애(failure)현상이 함수 고장(functional fault)이다. 고장검출의 문제는 바로 주어진 회로가 원래의 함수 f(x)를 실현하고, $f^*(x)$로 동작되지 않는다는 것을 검증하기 위한 효율적이고, 경제적인 테스트를 수행하는 것이다. 고장모델(fault model)이란 물리적인 회로 장애로 인한 함수의 동작을 함축적으로 표현한 것이다. p치 논리회로에서의 $s-a-i\ (0 \le i \le p-1)$ 고장이란 어떤 선이 0에서 (p-1)사이의 논리 값으로 고정되어 나타나는 고장모델을 말한다. p치 k 선으로 구성된 회로에서 단일 선의 고장은 pk 경우가 존재하고, 다중 선의 s-a-i 고장인 경우는 $(p+1)^k-1$의 고장이 발생할 수 있다.

정의 1.

n변수 p치 논리회로에서 다음 식을 그 회로의 syndrome으로 정의한다.

$$s_0 = \sum_{v=0}^{q} \overline{t_0}(v)y(v) = \sum_{v=0}^{q} y(v) = \sum_{v=0}^{q} a^{f(v)} \qquad (13)$$

여기서 $q = p^n - 1$ 이다.

이 syndrome은 함수적인 특성을 갖기 때문에, 어떤 함수에 대한 syndrome은 유일하게 존재한다. 따라서, 동일 함수에 대해 각기 다른 구현을 하더라도 그 syndrome은 같은 값을 갖게 된다.

앞으로 x_k 입력이 어떤 값 i $(0 \le i \le p-1)$에 stuck-at 된 고장을 x_k/i 로 표기하기로 한다.

1. 입력단자에 하나의 고장이 존재하는 고장모델인 경우

정리 1.

p치 논리회로 N의 주입력 $(x_1, x_2, \cdot\cdot\cdot, x_n)$중에서, 어느 하나의 입력이 $s-a-i\ (0 \le i \le p-1)$ 고장 발생시 그 고장은 다음 조건을 만족하는 경우 syndrome 테스트가 가능하다.

$$\sum_{k=1}^{q} t_{ki}^1 s_0^k \ne 0 \qquad (14)$$

(증명)

x_n의 고장에 대해 증명하면, 다른 입력의 고장에 대해서는 변수 치환에 의해 같은 방법으로 증명된다. x_n/i인 경우의 함수는 $f_i(x_1, x_2, \cdots, x_{n-1}) = f(x_1, x_2, \cdots, x_{n-1}, i)$로 표시한다. 이 경우 syndrome 테스트 가능하기 위해서는 함수 f_i의 0차 스펙트럴 계수가 정상 회로인 경우의 스펙트럼 s_0와 다른 경우에

만 가능하다. x_n/i인 경우 함수의 출력 벡터 Y^*는 다음과 같다.

$$Y_0^* = Y_1^* = Y_2^* = Y_i \tag{15}$$

$$S_0^* = S_1^* = S_2^* = S_i \tag{16}$$

식 (9), 식 (11), 식 (12)으로 부터, 단일 고장은 n-m=1인 경우이므로

$$S^{0*} = pS_i,\ S^{a*} = 0,\ 1 \le a \le p-1 \tag{17}$$

가 된다. 이때의 syndrome s_0^*는 다음과 같다.

$$s_0^* = ps_{i0} = p \cdot (\frac{1}{p}) \sum_{k=0}^{p-1} t_{ki}^1 s_0^k = s_0^0 + \sum_{k=1}^{p-1} t_{ki}^1 s_0^k \tag{18}$$

syndrome 테스트 조건은 $s_0 \ne s_0^*$이고, $t_{0i}^1 = 1$, $s_0 = s_0^0$이므로

$$\sum_{k=1}^{p-1} t_{ki}^1 s_0^k \ne 0$$ 증명끝

정리 2.

p치 논리회로 N의 주입력 $(x_1, x_2, \cdot\cdot\cdot, x_n)$중에서, 어느 하나의 입력이 $s-a-i\ (0 \le i \le p-1)$ 고장 발생시, 그 고장은 다음 조건을 만족하는 경우 s_j^0-testable 하다.

$$\sum_{k=1}^{p-1} t_{ki}^1 s_j^k \ne 0 \tag{19}$$

(증명)

식 (12)와 정리 1.의 증명으로 부터, xn/i인 경우 스펙트럼은 $S^{0*} = pS_i$이고, s_j^{0*}는 $s_j^{0*} = (p-1)s_{ij} = \sum_{k=0}^{p-1} t_{ki}^1 s_j^k = s_j^0 + \sum_{k=1}^{p-1} t_{ki}^1 s_j^k$ 가 된다.

따라서, $s_j^0 \ne s_j^{0*}$을 만족하기 위해서는 $\sum_{k=1}^{p-1} t_{ki}^1 s_j^k \ne 0$ 이어야 한다. 증명끝

정리 3.

p치 논리회로 N의 주입력 $(x_1, x_2, \cdot\cdot\cdot, x_n)$에서, 어느 하나의 입력이 $s-a-i$ 고장 발생시, 다음 조건을 만족하는 경우 그 고장은 s_j^a-testable 하다.

$$s_j^a \ne 0,\ 1 \le a \le p-1 \tag{20}$$

(증명)

x_n/i고장시 스펙트럼은 식 (17)로 부터 $S^{0*} \ne 0$, $S^{a*} = 0$, $1 \le a \le p-1$이 된다. 즉, $S^{a*} = 0$이 되므로, 그 원소 스펙트럼도 $s_j^{a*} = 0$, $1 \le a \le p-1$, $0 \le j \le p^{n-1}-1$이 된다. 따라서, 정상 회로의 스펙트럼 s_j^a 가 0이 아니면, s_j^a-testable 하다. 증명끝

2. 입력단자에 여러 개의 고장이 존재하는 고장모델인 경우

$f(x_1, x_2, \cdot\cdot\cdot, x_n)$에서 2단자 이상의 입력이 $s-a-i$ 고장이 발생된 경우, 즉, x_{m+i}/u_i, $1 \le i \le n-m$, $m < n$, $u_i = \{0, 1, 2 \cdot\cdot\cdot p-1\}$고장인 경우의 함수 f는 $f_u(x_1, x_2, \cdot\cdot\cdot, x_n) = f(x_1, x_2, \cdot\cdot\cdot, x_m, u_1, u_2, \cdot\cdot\cdot, u_{n-m})$로 표현할 수 있다.

단, $u_1, u_2, \cdot\cdot\cdot, u_{n-m}$은 u 의 p치 확장이다. 이때, 다중고장을 $(x_{m+1}, x_{m+2}, \cdot\cdot\cdot, x_n)/u$, $u = \sum_{i=1}^{n-m} u_i p^{i-1}$로 표현하면, $f_u(x_1, x_2, \cdot\cdot\cdot, x_n)$의 스펙트럼 S_u는 다음과 같다.

$$S_u = \overline{T_p^m}\, Y_u$$

f 의 스펙트럼 S는

$$S = \begin{bmatrix} S^0 \\ S^1 \\ S^2 \\ \vdots \\ S^\beta \end{bmatrix},$$ $\beta = p^{n-m}-1$과 같으며, $S^i\ (0 \le i \le \beta)$는 p_m 개의 원소로 구성되어 있다.

$(x_{m+1}, x_{m+2}, \cdot\cdot\cdot, x_n)/u$ 인 경우의 f의 부분함수로 표현되는 고장 함수의 출력은 Yu와 같기 때문에 다음과 같이 표현된다.

$$Y_0^* = Y_1^* = \cdot\cdot\cdot = Y_\beta^* = Y_u,\ \beta = p^{n-m}-1 \tag{21}$$

각 Y는 p^m개의 원소를 갖는다. 식 (21)로 부터 고장 함수의 스펙트럼을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_0^* = S_1^* = \cdot\cdot\cdot = S_\beta^* = S_u,\ \beta = p^{n-m}-1 \tag{22}$$

식 (7)과 (22)으로 부터

$$[S^{0*}\ S^{1*} \cdot \cdot \cdot \cdot \ S^{\beta *}] = [S_{0*}\ S_{1*} \cdot \cdot \cdot \ S_{\beta *}]\ \overline{T_p^{n-m}}$$
$$= [S_u\ S_u\ \cdot \cdot \cdot \ S_u]\ \overline{T_p^{n-m}} \quad (23)$$

따라서,

$$S^{i*} = [\ S_u\ S_u\ \cdot \cdot \cdot \ S_u\ ]\ \overline{T_{p*i}^{n-m}},\ 0 \le i \le p^{n-m}-1 \quad (24)$$

$$S^{0*} = p^{n-m} S_u,\quad S^{\alpha *} = 0,\ 1 \le \alpha \le \beta \quad (25)$$

$$S_u = \left(\frac{1}{p^{n-m}}\right)[\ S^0\ S^1\ \cdot \cdot \cdot \ S^\beta\ ]\ T_{p*u}^{n-m} \quad (26)$$

$$S^{0*} = [\ S^0\ S^1 \cdot \cdot \cdot \ S^\beta]\ T_{p*i}^{n-m},\ S^{\alpha *} = 0,\ 1 \le \alpha \le \beta \quad (27)$$

정리 4.

p치 논리회로에서 $(x_{m+1},\ x_{m+2}, \cdot \cdot \cdot, x_n)/u$ 와 같이 (n-m)개의 입력에 의한 다중 고장이 발생되는 경우, 정상적인 경우의 스펙트럴 계수 s_j^0가 (p^{n-m})배가 아닌 경우에는 그 고장은 s_j^0-testable 하다.

(증명)

식 (25)으로 부터, $(x_{m+1},\ x_{m+2}, \cdot \cdot \cdot, x_n)/u$ 의 고장 발생시 스펙트럴 계수 S^{0*}는 S_u의 (pn-m)배가 되므로, 정상적인 경우 스펙트럴 계수가 (pn-m)배가 아닌 것은 s_j^0-testable하여 증명된다. 증명끝

정리 5.

p치 논리회로의 입력이 $(x_{m+1},\ x_{m+2}, \cdot \cdot \cdot, x_n)/u$ 와 같이 (n-m)개의 다중 고장이 발생되는 경우, 다음 조건을 만족하는 경우 그 고장은 s_j^α-testable 하다.

$$s_j^\alpha \ne 0\quad ,1 \le \alpha \le p^{n-m}-1 \quad (28)$$

(증명)

$(x_{m+1},\ x_{m+2}, \cdot \cdot \cdot, x_n)/u$ 고장 발생시 스펙트럼은 식 (23)~(25)으로부터 $S^{0*} = p^{n-m} S_u$, $S^{\alpha *} = 0$, $1 \le \alpha \le p^{n-m}-1$ 가 됨을 알 수 있다. 따라서, $s_j^{\alpha *} = 0$ 이 되므로 정상 회로의 스펙트럼 s_j^α 가 0 아니면, s_j^α-testable 하다. 증명끝

3. 회로내부에 고장이 있는 고장모델인 경우

다치 논리회로에서 단일 내부선 stuck-at 고장은, 주입력을 제외한 회로 내에 있어서 어떤 선의 장애로 정의할 수 있다. 이 경우 회로의 출력도 내부 선으로 간주된다. 회로의 특정 내부선 g에 대해, 다음과 같은 함수 모델로 표시할 수 있다.

$$f(x_1,\ x_2,\ \cdot \cdot \cdot,\ x_n) = h(x_1, x_2, \cdot \cdot \cdot, x_n,\ g),$$
$$g = g(x_1, x_2, \cdot \cdot \cdot, x_n) \quad (29)$$

내부선 g를 x_{n+1}의 입력으로 간주한 유수(residual) 회로, $h(\ x_1,\ x_2, \cdot \cdot \cdot,\ x_n,\ x_{n+1})$의 스펙트럴 계수 $\hat{S}$를 식 (6)~(12)과 유사한 방법으로 구하면 다음과 같다.

$$[\hat{S}_0,\ \hat{S}_1,\ \cdot \cdot \cdot, \hat{S}_\beta] = \left(\frac{1}{p}\right)[\hat{S}^0,\ \hat{S}^1,\ \cdot \cdot \cdot, \hat{S}^\beta]\,T_p^1 \quad (30)$$

$$\hat{S}_i = \left(\frac{1}{p}\right)[\hat{S}^0, \hat{S}^1,\ \cdot \cdot \cdot, \hat{S}^\beta]\,T_{p*i}^1 \quad (31)$$

$$\hat{S}^i = [\hat{S}_0, \hat{S}_1,\ \cdot \cdot \cdot, \hat{S}_\beta]\,\overline{T_{p*i}^1}$$

$$\widehat{s_{ij}} = \left(\frac{1}{p}\right)\sum_{k=0}^{p-1} t_{ki}^1\ \hat{s}_j^k \quad (32)$$

단, $0 \le \beta, i \le (p-1)$, $0 \le j \le p^n-1$이고, $\hat{S}_i^*$, $\hat{S}^{i*}$는 p_n개의 원소로 구성됨.

정리 6.

p치 논리회로의 내부 선을 g라 할 때, g/i의 고장은 다음 조건을 만족하면, syndrome 테스트가 가능하다.

$$s_0 \ne \widehat{s_{i0}} = \left(\frac{1}{p}\right)\sum_{k=0}^{p-1} t_{ki}^1 \hat{s}_0^k \quad (33)$$

(증명)

g/i인 경우 회로 N은 h(X, i) 의 함수가 되고, 식 (30), (31), (32) 으로 부터 이때의 syndrome은 $\widehat{s_{i0}}$가 됨을 알 수 있다. 즉, 원래의 회로 N은 n 개의 입력 함수인데, 이 식들은 (n+1)의 입력 함수에 대한 스펙트럴 계수및 syndrome이므로 (1/p)배 하여야 회로

N의 값이 된다. g/i일 경우 회로 N의 syndrome을 s_0^*라고 하면, syndrome 테스트 조건 $s_0 \neq s_0^*$과 식 (32)으로 부터 다음식이 성립하기 때문에 증명된다.

$$s_0^* = (\frac{1}{p}) \cdot (p\widehat{s_{i0}}) = (\frac{1}{p})\sum_{k=0}^{p-1} t_{ki}^1 \widehat{s_0^k}$$ 증명끝

정리 7.

p치 논리회로의 내부 선을 g라고 할 때, g/i인 경우의 고장은 다음 조건을 만족하면, s_j-testable 하다.

$$s_j \neq (\frac{1}{p})\sum_{k=0}^{p-1} t_{ki}^1 \widehat{s_j^k} \tag{34}$$

(증명)

식 (31), (32) 으로부터, g/i고장인 경우는 $\widehat{S^{0*}} = \widehat{S_i}$, $\widehat{S^{a*}} = 0$, $1 \le a \le p-1$ 된다.

따라서, $s_j^* = \widehat{s_{ij}} = (\frac{1}{p})\sum_{k=0}^{p-1} t_{ki}^1 \widehat{s_j^k}$가 된다. s_j-testable 하기 위해서는 $s_j \neq s_j^*$가성립하여야 되기 때문에 증명된다. 증명끝

4. 고장으로 인해 입력변수의 일부가 함수에 독립적으로 된 경우

함수의 입력에 발생된 stuck-at 고장으로 인해, 입력변수의 일부가 함수 $f(X)$에 독립적으로 된 경우의 고장분석 및 검출을 위해서는, 스펙트럴 계수가 입력변수와 함수출력과의 상관관계를 갖는 성질을 이용할 수 있다. 즉, 입력의 일부가 함수 $f(X)$에 독립적일 경우 그 변수와 관계된 스펙트럴 계수는 모두 0이 되는 특성을 사용하여 고장검출 및 분석에 적용하는 것이 가능하기 때문이다.

이 경우에 각 스펙트럴 계수의 변화에 대해서는 아래와 같이 정리할 수 있다. 이들 성질을 이용하여 독립 변수화된 고장을 테스트 할 수 있게 된다.

정리 8.

함수 f(X)가 그 입력의 부분집합인 $\{x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{ik}\}$에 독립적이면 $1 \le i_j \le n$, $1 \le j \le k$, $a \cap \{i_1, i_2, \cdot\cdot\cdot, i_k\} \neq 0$ 인 모든 S^a는 0의 값을 갖는다.

(증명)

변수를 치환하여 $\{x_{m+1}, x_{m+2}, \cdot\cdot\cdot, x_n\}$ 입력에 대하여 증명한다. 이들 독립적인 입력변수에 의한 부분함수의 스펙트럼은 서로 같다. 즉, $S_0 = S_1 = \cdots = S_\beta$, $\beta = p^{n-m} - 1$가 된다. $[S^0 \; S^1 \cdots \; S^\beta] = [S_0 \; S_1 \cdots \; S_\beta]\, \overline{T_p^{n-m}}$ 식에 있어서, $\overline{T_p^{n-m}}$ 행렬은 첫 번째 행을 제외하고는 모두 p^{n-m-1} 개의 1, p^{n-m-1} 개의 a, …, p^{n-m-1} 개의 a^{p-1} 로 구성된다.

따라서, $S^1 = S^2 = \cdots = S^\beta = 0$ 이 된다. 즉, 이들 스펙트럴 계수는 함수 f(X)에 독립적인 입력변수 $\{x_{m+1}, x_{m+2}, \cdots, x_n\}$와 상관관계를 갖기 때문에 모두 0이 됨을 알 수 있다. 증명끝

정리 9.

함수 $f(X)$에 s-a-f 가 발생된 고장함수를 $f^*(X)$라고 할 때, 그 고장으로 인해 입력 $\{x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{ik}\}$, $1 \le i_j \le n$, $1 \le j \le k$ 가 $f^*(X)$ 에 독립적으로 된 경우, 그 고장은 $S^a \neq 0$, $a \cap \{i_1, i_2, \cdot\cdot\cdot, i_k\} \neq 0$ 이면, s_j^a로 테스트 가능하다.

(증명) 정리 8에 의해 $S^{a*} = 0$ 이 된다. 따라서, $S^{a*} \neq S^a$ 이므로, s_j^a 에 의해 테스트 가능하게 되어 증명된다. 증명끝

정리 10. 함수 $f(X)$가 입력 $\{x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{ik}\}$, $1 \le i_j \le n$, $1 \le j \le k$ 에 독립적일 경우, S^0 의 모든 스펙트럴 계수는 (p^{n-m})배가 된다.

(증명)

정리 8로 부터, $S_0 = S_1 = \cdots = S_\beta$, $S^1 = S^2 =$, $\cdots = S^\beta = 0$, $\beta = p^{n-m} - 1$ 되므로, $S^0 = p^{n-m} S_a$ 가 된다. 여기서, S_a는 독립적인 입력에 대한 부분함수의 스펙트럴 계수이다. 증명끝

정리 11.

회로 N에서의 s-a-f 로 인해, (n-m)개의 입력을 고장함수 $f^*(X)$에 독립적인 변수로 하는 고장은, s_j^0가 (p^{n-m})의 정수배가 아닌 경우, s_j^0로 테스트 가능하다.

(증명)

정리 10으로 부터 입력변수에 독립적인 경우, S^0는 그 부분함수의 스펙트럴 계수의 (p^{n-m}) 배가 되기 때문에, $s_j^{0*} \neq s_j^0$ 가 된다.

증명끝

Ⅳ. 고장검출을 위한 스펙트럴 계수의 비교

p치 n변수인 함수에 대한 전체 스펙트럴 계수의 수는 p^n개가 된다는 것은 이미 앞장에서 살펴보았다. 단일입력, 다중입력, 내부선의 stuck-at 고장 및 독립변수화된 고장과 Min/Max bridging 고장을 검출하기 위해서는 p^n 개 전체의 스펙트럴 계수가 사용되는 것이 아니고, Ⅲ장의 정리에서 유도된 검출 조건에 따라 각 계수의 일부가 사용된다.

표 1. 고장검출을 위해 필요한 스펙트럴 계수의 수.

Table 1. The number of spectral coefficient to detect the fault.

고장의 종류	테스트를 위한 계수		스펙트럴 계수의 수
입력단자에 하나의 s-a 고장인 경우	Syndrome		(p-1)
	S_j^0 - testable		Upper : $(p^n - p^{n-1})$ Lower : (p-1)
	S_j^a - testable		Upper : $(p^n - p^{n-1})$ Lower : 1
입력단자에 여러개의 s-a 고장인 경우	p^{n-m} 배의 S_j^0 - testable		Upper : p^m Lower : 1
	S_j^a - testable		Upper : $P^m(p^{n-m} - 1)$ Lower : 1
	S_j^0 - testable		Upper : p^m Lower : 1
내부선의 고장	단일고장	Syndrome	(p-1)
	단일고장	S_j^0 - testable	Upper : $(p^n - p^{n-1})$ Lower : p - 1
	다중고장	S_j^0 - testable	Upper : p^m Lower : 1
독립변수화된 고장	p^{n-m} 배의 S_j^0 - testable		Upper : p^m Lower : 1
	S_j^0 - testable		Upper : p^m Lower : 1

또한 검출 조건을 만족하는 계수의 성질에 따라 필요한 스펙트럴 계수의 수가 달라지기 때문에 사용 계수의 상한 값과 하한 값이 존재한다. 지금까지 유도한 각 고장 모델에 있어서 해당 고장을 검출하기 위해 필요한 스펙트럴 계수의 상한, 하한의 값은 표 1과 같다.

표 1에서 n은 다치논리회로의 입력의 수이고, (n-m)은 다중 입력 stuck - at 고장, 독립 변수화된 입력 단자의 수이다.

예를 들어 표 1에서 단일 입력 고장인 경우를 살펴보면, p=3, n=3인 경우에 각 고장에 대해 그 계수의 수는 다음과 같다.

첫째, Syndrome 테스트인 경우의 사용되는 계수는 2개이므로, 총 스펙트럴 계수 27개중 약 7.41% 만이 사용된다. 둘째로, s_j^0-testable인 경우는 상한 값이 18개의 계수로 총 계수의 약 66.7%가 사용되게 된다. 하한 값은 syndrome 인 경우와 마찬가지로 약 7.41%의 계수가 사용된다. s_j^a-testable인 경우는 상한 값이 약 66.7%이고, 하한 값은 1개의 계수가 사용되므로 약 3.7%의 계수가 사용된다.

또한, 다중 입력 고장 및 내부선의 고장의 판별을 위한 스펙트럴 계수의 수는 고장이 발생된 입력 수인 (n-m)의 값에 따라 계산에 사용되는 계수의 수가 달라진다.

다치논리회로의 고장검출방법은 2치 조합논리회로의 검출방법인 부울 차분방법이나 경로 응동방법을 다치논리회로로 확장시킨 것으로서, 2치에서의 문제점을 그대로 안고 있다. 또한, 현재 다치논리회로를 구현하는 전용 소자가 없기 때문에 고장검출 대상 역시 트랜지스터 레벨보다 게이트 레벨에서 구현되고 있다. 다치논리회로의 고장검출을 위한 기존의 방법인 Logic Differenece[3], Map Method[4], Partial Derivatives[5], Decision Difference[11] 및 Reed Muller[6] 방법등은 고장검출을 위해 테스트 벡터를 이용하고 있기 때문에, 특정 고장을 검출하기 위한 테스트 데이터의 생성과 테스트시 이 벡터의 저장을 위한 메모리 역시 필요하게 된다. 따라서 칩내에 테스트 기능회로를 갖는 내장형 테스트 회로설계에도 본 논문에 의한 테스트 방법이 유리하다는 것을 알 수 있다.

주어진 회로를 테스트하고자 할 경우에는 이와 같이 계산된 검출 조건을 이용하여 해당 고장을 검출하기 위한 고장검출 기호를 구성하고, 그 기호에 의한 테스트 회로와의 비교에 의해 정상 동작 여부를 검사하게

된다.

따라서, 서론에서 살펴본 바와 같이 스펙트럴 방법에 의한 고장검출은 스펙트럴 계수가 모두 사용되지 않기 때문에 출력 데이터를 압축시켜 테스트 한다는 것을 확인할 수 있다.

$p=3$인 경우 단일 입력 고장인 경우 입력 변수에 따른 스펙트럴 계수를 살펴보면, 고장검출을 위해서는 상한 값인 (p^n-p^{n-1})과 하한 값인 $(p-1)$의 계수가 사용되며, 전체 스펙트럴 계수 수 인 p^n보다는 작다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 스펙트럴 기법을 이용하여 다치논리함수의 고장분석 및 검출에 대하여 논하였다. MVL 회로의 함수 영역에서의 분석이 아닌 스펙트럴 영역에서의 분석을 수행함으로써, 고장으로 인한 스펙트럴 계수의 변환특성을 이용한 검출 방법으로서, 테스트 벡터 생성 없이 MVL 함수의 고장검출 방법을 제안하였다.

즉, MVL 함수의 단일입력 s-a-f, 다중입력 s-a-f, 내부선의 s-a-f에 대하여 모든 입력 조합을 인가하여 얻어진 스펙트럴 계수의 분석을 통하여 고장검출 조건을 유도 및 증명하였으며, 그 유용성을 입증하였다. 또한, MVL 함수에서 s-a-f의 고장으로 인해, 독립 변수화된 고장에 대한 스펙트럴 분석에 의한 고장분석 및 검출 조건의 유도하고, 증명하였다.

스펙트럴 방법을 이용한 MVL 회로의 고장검출시, 사용되는 계수에 대해 각 고장 모델에서의 상한 값과 하한 값에 관하여 분석, 비교하였다.

결론적으로, 테스트 벡터의 생성 없이 MVL 함수의 고장검출이 가능하기 때문에, 테스트 벡터의 생성을 위한 복잡한 연산을 최소화할 수 있다. 또한, 전체 스펙트럴 계수 p^n개 모두가 고장검출에 사용되지 않고, 부분 계수를 사용하기 때문에 출력 데이터의 압축 방법에 의한 테스트의 효과를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

참 고 문 헌

[1] S.L. Hurst, D.M. Miller, and J.C. Muzio, *Spectral Techniques in Digital Logic*, New York, Academic Press, 1985.

[2] V.H. Tokmen, "Disjoint decomposability of multi-valued functions by spectral means," Proc. on 10th ISMVL, pp.88-9p, 1980.

[3] Y. M. Ajabnoor and M. H. Abd-El Barr, "Stuck-type fault detection in multi-valued combinational circuits," Proc. of 11th ISMVL, pp. 275-282, May 1981.

[4] H. Y. Lo and S. C. Lee, "A map-partition method for the fault detection of mutivalued and multi-level combinational logic circuits," Proc. of 11th ISMVL, pp. 28p-289, May 1981.

[5] H. Lu and S. C. Lee, "Fault detection in M-logic circuits using the M-difference," Proc. of 14th ISMVL, pp. 62-70, May 1984.

[6] T. Damarla, "Generalized transforms for multiple valued circuits and their fault detection," IEEE Trans. on Computer, vol. C-41, pp. 1101-1109, Sept. 1992.

[7] M.G. Karpovsky, *Spectral Techniques and Fault Detection*, New York, Academic Press, 1985.

[8] Kim Jong-O, Kim Young-Gun, Kim Heung-Soo and et. al., "Fault analysis of ternary logic using spectral method," Proc. of JTC-CSCC , pp. 651-654, July 1995.

[9] J.C. Muzio, *Multiple-valued switching theory*, Accord, Adam Hilger, 1986.

[10] T. A. Guima and M. A. Tapia, "Differential calculus for fault detection in multivalued logic networks," Proc. of 17th ISMVL, pp. 99-108, May 1987.

[11] M. Whitney and J. Muzio, "Decisive difference and partial differences stuck-at fault detection in MVL circuits," Proc. of 18th ISMVL, pp. p21-p28, May 1988.

저 자 소 개

金 鍾 五(正會員)

1957년 12월 17일생.
1980년 2월 인하대학교 전자공학과(공학사). 1982년 2월 서울대학교 대학원 제어계측공학과(공학석사). 1996년 2월 인하대학교 대학원 전자공학과(공학박사). 1982년 11월~1989년 9월 LG전자 정보기기 연구소 선임 연구원. 1989년 9월~현재 동양공업전문대학 전기전자통신공학부 부교수. 주관심 분야는 회로 및 시스템 설계, 다치논리회로 설계, 퍼지논리, 고장검출, 마이크로세서 응용 등임.

申 平 浩(正會員)

1945년 10월 23일생.
1972년 3월 한양대학교 공과대학 전자공학과(공학사). 1978년 8월 연세대학교 산업대학원 전기전자졸(공학석사). 1979년 3월~현재 동양공업전문대학 전기전자통신공학부 교수, 주관심 분야는 회로 및 시스템 설계 등임