

공학석사 학위논문

릴레이 회로의 개선된  
EMFG 변환

지도교수 여 정 모

이 論文을 韓國 學位論文으로 提出함



2002년 2월

부경대학교 산업대학원

전산정보학과

백형구

이 논문을 백형구의 공학석사  
학위논문으로 인준함

2001년 12월 15일

주 심 이학박사 윤 성 대



위 원 공학박사 김 영 봉



위 원 공학박사 여 정 모



## <차 례>

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 표 차례 .....                           | ii  |
| 그림 차례 .....                          | iii |
| Abstract .....                       | v   |
| 1. 서론 .....                          | 1   |
| 2. 관련연구 .....                        | 4   |
| 2.1 기존의 EMFG .....                   | 4   |
| 2.1.1 EMFG의 정의 .....                 | 4   |
| 2.1.2 EMFG의 성질 .....                 | 5   |
| 2.2. 시퀀스 제어계 .....                   | 8   |
| 2.2.1. 시퀀스 제어계의 구성 .....             | 8   |
| 2.2.2. 일반적인 릴레이 시퀀스 .....            | 9   |
| 3. 릴레이 회로의 표현과 성질 .....              | 11  |
| 4. 조건 아크의 도입 .....                   | 18  |
| 5. 릴레이 회로의 EMFG 변환 .....             | 21  |
| 5.1 릴레이 회로의 EMFG 표현 .....            | 21  |
| 5.2 타이머를 포함하는 릴레이 회로의 변환 .....       | 25  |
| 5.3 EMFG 변환 단계 .....                 | 26  |
| 6. 응용 예 .....                        | 28  |
| 6.1 교통 신호등의 동작과 회로 .....             | 28  |
| 6.2 교통 신호등 시스템 릴레이 회로의 EMFG 변환 ..... | 28  |
| 6.3 변환된 EMFG의 동작 분석 .....            | 32  |
| 6.4 수치 시뮬레이션 .....                   | 33  |
| 7. 결론 .....                          | 40  |
| 참고문헌 .....                           | 42  |

## <표 차례>

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 표 1. 입력행렬( $T_i$ ) .....             | 34 |
| 표 2. 출력행렬( $T_o$ ) .....             | 34 |
| 표 3. 접속행렬( $T_b = T_o - T_i$ ) ..... | 35 |
| 표 4. 점화조건 행렬( $C$ ) .....            | 35 |
| 표 5. 동작 알고리즘의 결과표 .....              | 38 |

## 〈그림 차례〉

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 그림 1 트랜지션의 점화조건 .....                  | 6  |
| 그림 2 트랜지션의 점화동작 .....                  | 7  |
| 그림 3 시퀀스 제어계의 개념도 .....                | 8  |
| 그림 4 릴레이 시퀀스 .....                     | 9  |
| 그림 5. 릴레이 회로의 예 .....                  | 12 |
| 그림 6. 조건 아크의 표현 .....                  | 18 |
| 그림 7. 조건 아크와 자기보존 아크가 있는 EMFG의 예 ..... | 19 |
| 그림 8. 그림 5의 릴레이 회로를 변환한 EMFG .....     | 24 |
| 그림 9. 교통 신호등 시스템의 릴레이 회로 .....         | 29 |
| 그림 10. 교통 신호등 시스템의 EMFG .....          | 31 |

# **The improved EMFG conversion from Relay circuits**

## **Abstract**

Many of the sequential circuit among lots of ways of the sequential control is implemented by the relay circuit. It is very difficult to design and analyze the relay circuit, because one have to consider and analyze in order the behavior in which the relay contacts. So, we need the design method that visually indicate and analyze status of the circuit movement.

In this paper, we propose the conversion from the relay circuit to EMFG(Extended Mark Flow Graph). EMFG is the powerful tool to design the distributed control system or the factory automation control circuit. It can represent synchronism and parallelism well. In addition, it can represent synchronous or asynchronous system with ease, and convert into the real circuit.

We define the converting method to the EMFG based on the definition about the relay-circuit forming factor. And We propose converting method from the relay circuit to the

EMFG, add Conditional Arc to the EMFG, to make the characteristics of the relay-circuit exactly applied to the EMFG.

To analyze and check the EMFG that converted the relay circuit will give you a lot of benefits.

## 1. 서론

산업 현장에서는 시장의 변화에 따른 ‘생산 라인 변경’이 큰 문제로 지적되고 있다. 다품종 소량 생산을 위한 설비를 통해 필요한 양을 필요로 할 때 즉시 만들 수 있어야 하며, ‘생산 라인 변경’에 대해서도 유연성이 강조되는 재 이용 효과가 높은 설비가 요구되고 있고, 이러한 자동화의 환경은 유연성이 있는 자동화시스템을 요구하게 되어 기계나 설비의 소프트웨어화를 초래하였다. 이러한 자동화시스템을 제어하는 자동제어에는 미리 정해놓은 순서에 따라서 제어의 각 단계가 순차적으로 진행되는 시퀀스제어(sequential control)와 기계 스스로 제어의 필요성을 판단하여 수정 동작을 하는 피드백 제어(feedback control)가 있으며 이 중 시퀀스제어가 가공 공정의 자동화 등 공정자동화의 주체를 이루고 있다.[6-9]

시퀀스제어의 기술 방법에는 릴레이 심볼(Relay Symbol)방식, 논리 심볼(Logic Symbol)방식, 플로우 차트(Flow Chart)방식이 사용되어왔다. 특히, 시퀀스제어(sequential control)의 여러 가지 기술 방법들 중 많은 시퀀스 제어회로들이 릴레이 회로로 구현되어 왔는데, 이때는 작성된 회로에서 각 릴레이 접점들이 동작되는 상황을 순서적으로 파악하면서 해석하고 분석해야하므로 검증이 매우 어렵다. 지금까지 설계자들은 타임차트나 블록도 등으로 시스템의 흐름을 나타내고, LD(Ladder Diagram)나 SFC(Sequential Function Chart)로

프로그램을 기술하고 있지만, 설계단계에서 시퀀스 추이 체크나 이상개소의 엄밀한 검출이 어려운 실정이다.[4.5.10]

이를 위한 방안으로 페트리네트(PN : Petri Net)를 이용한 시퀀스제어의 설계법이 제안되었다.[11.-13] PN은 시퀀스제어가 갖는 비동기성, 동시진행성, 병렬성을 표현하기에 용이한 그래픽 표현과 거동분석을 위한 대수방정식 표현이 가능하여 컴퓨터 상에서의 일관된 시퀀스제어의 설계를 가능케 한다.

본 논문에서는 확장된 마크흐름선도(EMFG: Extended Mark Flow Graph)를 이용하여 릴레이 회로를 변환하고자 한다. 페트리네트(PN : PetriNet)[11-13]에서 파생된 EMFG는 이산제어시스템 및 공장자동화의 제어회로 등을 모델링하고 설계할 때 사용할 수 있는 강력한 도구로 실제회로로 변환될 수 있다. 또한 시스템의 동시성이나 병렬성을 잘 표현할 수 있으며 시스템을 개념적으로 설계할 수 있게 하고, 시스템의 동작을 상세하게 분석할 수 있어 동기 및 비동기 시스템에도 그 적용이 쉽다.[14.-16]

설계된 릴레이 회로를 이러한 EMFG로 변환함으로써 릴레이 회로의 구성을 쉽게 파악할 수 있기 때문에 릴레이 회로의 분석이 용이할 뿐만 아니라 이를 통한 회로 설계시 회로구성에 대한 고려가 가능하고, EMFG의 상태천이 방정식을 통하여 시스템의 동작을 쉽게 분석할 수 있으므로 회로 설계시 재반영하거나 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. [17.-20]

본 논문의 구성은 먼저 EMFG의 이론에 대한 내용을 살펴본 뒤 릴레이 회로의 특성을 파악한다. 그런 다음 릴레이 회로를 EMFG로 변환하기 위해 릴레이 회로의 구성 요소들에 대한 정의를 바탕으로 EMFG로 변환하는 방법을 정의한다. 이어서 릴레이 회로의 특성이 정확하게 EMFG에 적용되도록 하기 위하여 EMFG에 조건 아크를 도입하여 릴레이 회로를 EMFG로 변환하는 방법을 제안한다. 먼저 조건아크에 대한 정의와 이에 따른 EMFG의 점화조건 및 점화동작에 대해서도 정의를 내린다. 끝으로 교통 신호등 시스템의 릴레이 회로를 제안한 방법으로 EMFG로 변환을 해보고 변환된 EMFG에 대한 수학적 동작 해석을 통한 검증을 보인다.

## 2. 관련연구

본 장에서는 EMFG와 시퀀스 제어계에 대해 알아 본다.

### 2.1 기존의 EMFG

#### 2.1.1 EMFG의 정의

EMFG G에서 박스(box)의 집합을 B, 트랜지션(transition)의 집합을 T, 트랜지션에 대한 입력함수를 I, 트랜지션에 대한 출력함수를 O, 각 박스의 마크 상태를 나타내는 마크 벡터를 M 이라 할 때, EMFG G는 다음의 식 1과 같은 5개의 순서쌍으로 정의되는 선도이다.

$$G = \{ B, T, I, O, M \} \quad [\text{식 1}]$$

박스는 상태(개념적인 상태, 제어 상태, 신호 상태 등)를 나타내며, 상태의 만족 여부는 박스 내에 마크를 두어 표시한다. 즉 박스의 상태가 만족되면 마크를 두고, 만족되지 않으면 마크를 두지 않는다. 트랜지션은 박스(들)의 상태가 조합되어 박스 자신의 상태가 변화하거나 다른 박스(들)의 상태를 변화시키는 곳, 즉 전이가 일어나는 곳이다. 그리고 트랜지션에서 전이가 일어나는 과정을 트랜지션이 점화(fire)한다고 한다. 아크는 박스와 트랜지션 사이에서 트랜지션의 점화조건을 결정하는 것으로 일반아크와 역아크로 구분되며, 트랜지션이 점화될 때의 박스의 마크 상태를 결정한다. EMFG는 안전(safe)한 그

래프이므로 상태를 나타내는 박스의 마크 수를 0이나 1로 나타낼 수 있다. 입출력 함수 I와 O는 트랜지션에 입력 또는 출력으로 연결된 아크 및 박스를 판별할 수 있으므로 상호간의 관계를 표현한 식이 된다. 마크 벡터  $M$ 은 박스들의 마킹 상태에 대한 벡터로 표현된다. 이렇게 기호화되고 수학적으로 표현된 EMFG를 이용하면 시스템의 동작을 수학적으로 해석할 수가 있다.[18]

### 2.1.2 EMFG의 성질

#### (1) 트랜지션의 점화조건

상태를 표현하는 박스는 자신에게 연결된 트랜지션(들)의 점화 가능 유무에 따라 마크의 상태가 변화한다. 트랜지션의 점화는 트랜지션의 모든 입력 박스(들)의 마크 상태가 모두 조건에 부합되어야 한다. 이 점화조건들은 연결된 아크의 종류에 따라 달라진다. 즉 그림 1(a)와 같이 일반 아크로 연결된 입력 박스에는 마크가 있어야 조건에 부합되고, 그림 1(b)와 같이 역 아크로 연결된 입력 박스에는 마크가 없어야 조건에 부합된다. 그리고 그림 1(c)의  $t_3$ 와 같은 소스 트랜지션(source transition)은 입력 박스가 없는 트랜지션으로 점화조건을 부합시킬 어떤 입력 박스도 없으므로 항상 점화조건이 만족되어 있다.

또한 그림 1(d)와 (e)의 예 처럼 트랜지션의 모든 입력 박스(들)의 마크상태와 아크의 종류가 모두 조건에 부합되어야 한다.[18]

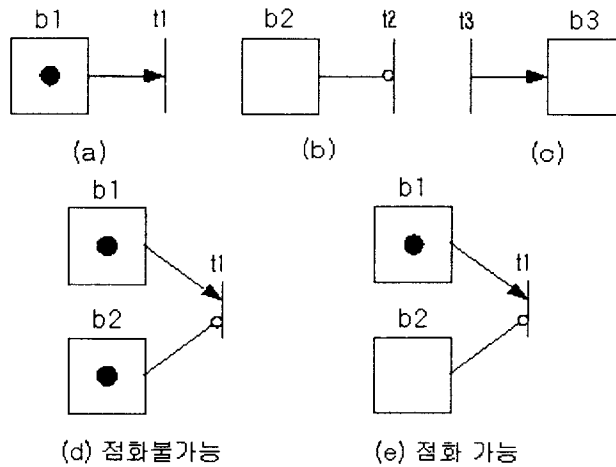


그림 1 트랜지션의 점화조건

## (2) 트랜지션의 점화동작

트랜지션이 점화하는 경우, 트랜지션에 연결된 박스의 마크 상태는 연결된 아크의 종류에 따라 다르게 변화한다. 즉, 그림 2(b)/(d)와 같이일반/역 아크로 연결된 입력 박스의 마크는 그대로 소멸/보존되고, 트랜지션에서 일반/역 아크로 연결된 출력 박스에는 마크가 없/있으면 생성/소멸되고, 마크가 있/없으면 그대로 유지된다. 또한 EMFG는 충돌박스(conflict box: 두 개 이상의 출력 아크를 가진 박스)의 마크가 다수의 출력

트랜지션의 점화조건을 동시에 만족시키는 경우, 모든 트랜지션이 동시에 점화된다.[18]

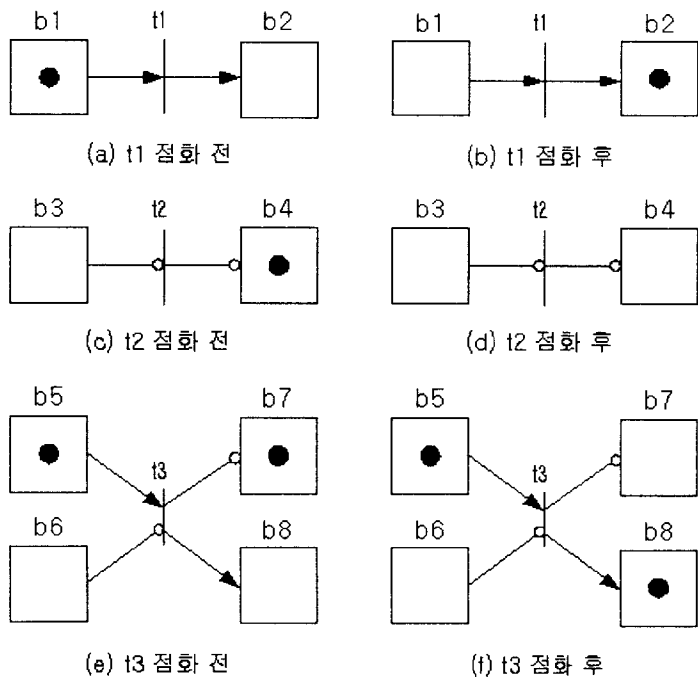


그림 2 트랜지션의 점화동작

## 2.2. 시퀀스 제어계

### 2.2.1. 시퀀스 제어계의 구성

기계나 장치의 다양화, 복잡화, 고속화가 가속화되면서 자동화에 대한 제어의 역할은 매우 중요하며, 특히 공장 자동화 분야에서의 시퀀스 제어는 없어서는 안될 중요한 제어 수법이다. 시퀀스 제어계에서는 사람으로부터 명령을 받아 명령처리부에 신호를 전달하는 조작부와, 조작부에서 주어지는 지령이나 작업 명령을 처리하고 그 내용을 분석하는 명령처리부, 제어대상 기기의 제어량 상태를 검출하는 검출부, 다시 제어대상 기기의 동작상태나 고장상황을 보고하는 표시·경보의 표시부 등으로 구성된다. 이러한 시퀀스 제어계의 개념도를 아래의 그림에 나타냈다.

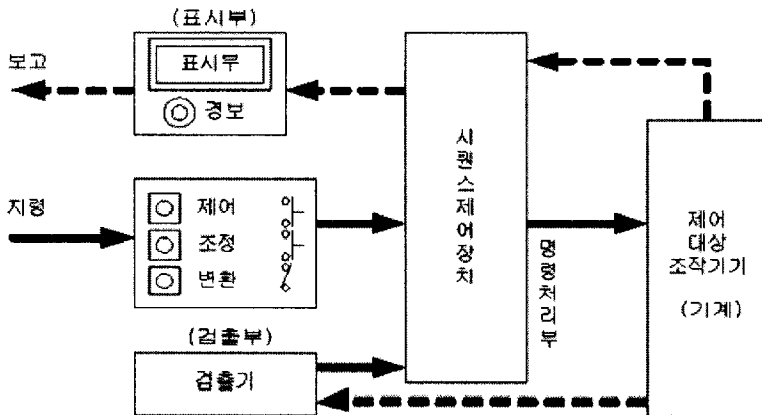


그림 3 시퀀스 제어계의 개념도

### 2.2.2. 일반적인 릴레이 시퀀스

제어 회로에 사용되는 소자로서 유접점 릴레이 즉, 전자 계전기에 의하여 구성되는 시퀀스를 접점을 가진 기기를 사용한다 해서 유접점 시퀀스(relay sequence)라 하며, 보통 이를 릴레이 시퀀스라 부른다. 이 릴레이 시퀀스는 기계적 가동접점이 전자석에 의해 동작되어 통전(ON), 또는 단전(OFF)시킨다. 그림 4는 릴레이 시퀀스의 대표적인 회로의 예로 3상 유도 전동기의 운전·정지의 제어를 위해 릴레이와 전자 개폐기를 사용한 회로이다.

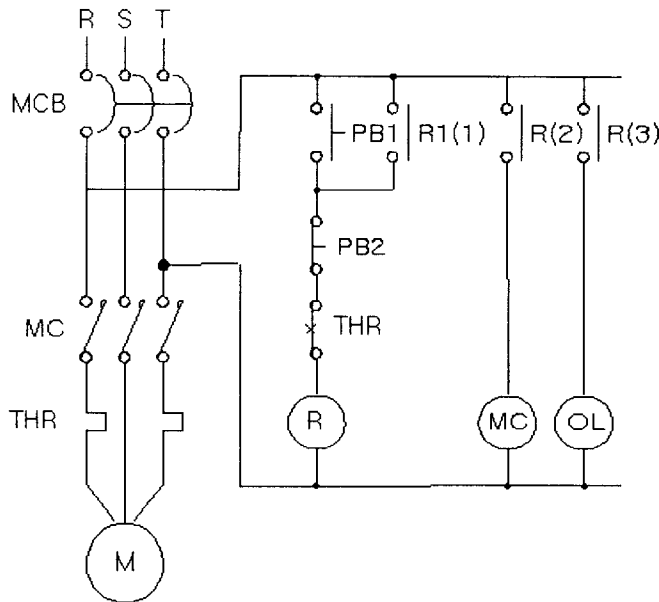


그림 4 릴레이 시퀀스

그림 4의 릴레이 회로의 동작원리는 다음과 같다.

- ① 모터 운전 스위치 PB1을 누르면 R이 동작하고, 릴레이 자신의 접점인 R(1)으로 자기유지(自己維持) 회로를 구성한다.
- ② 동시에 R(2) 접점이 닫혀 전자 접촉기 MC 코일이 여자되고, 그 결과 MC 접점이 닫혀 모터가 회전한다. 이 때 R(3) 접점도 닫히므로 운전표시 램프 OL도 점등된다.
- ③ 정지 스위치인 PB2를 누르면 릴레이 R이 복구한다. 따라서 접점 R(1), R(2), R(3)이 동시에 복귀되므로 자기유지 회로가 해제되고 전자 개폐기 MC도 복귀되며, 동작표시 램프 OL도 소등된다.

### 3. 릴레이 회로의 표현과 성질

릴레이 회로를 표현하는데 필요한 용어들에 대한 정의는 다음과 같다.

정의 1) 릴레이 회로에 사용되는 소자들을 다음과 같이 정의한다.

- ① 출력 : 릴레이 회로의 출력으로서 릴레이 출력과 비릴레이 출력으로 구분
- ② 릴레이 출력 : 릴레이 접점들을 구동시킬 수 있는 릴레이 회로의 출력    ③ 온(ON) 타이머 : 시한동작-순시복귀 동작하는 타이머 릴레이
- ④ 오프(OFF) 타이머 : 순시동작-시한복귀 동작하는 타이머 릴레이
- ⑤ 비릴레이 출력 : 릴레이 출력이 아닌 릴레이 회로의 출력
- ⑥ 입력소자 : 출력을 동작시키는데 필요한 릴레이 회로 내의 소자
- ⑦ 수동 입력소자 : 인위적으로 또는 수동적으로 동작하는 입력소자
- ⑧ 접점 입력소자 : 릴레이 출력에 의해 동작되는 입력소자

수동 입력소자에는 각종 스위치나 푸시 버튼 등이 있고, 접점 입력소자에는 릴레이 출력이 동작되어 즉 릴레이가 여자되

어 동작되는 릴레이 접점들이 있다. 또 온 타이머는 릴레이가 여자되어 설정 시간이 경과한 후에 릴레이 접점들이 동작되며 릴레이가 소자되는 즉시 릴레이 접점들이 해제되는 릴레이이고, 오프 타이머는 릴레이가 여자되는 즉시 릴레이 접점들이 동작되고 릴레이가 소자되어 설정 시간이 경과한 후에 릴레이 접점들이 해제되는 릴레이이다. 일반 릴레이 및 온 타이머와 오프 타이머 등의 출력이 릴레이 출력이고, 이들을 제외한 출력이 비릴레이 출력이다. 비릴레이 출력에는 표시등이나 모터 구동 등의 출력이 있을 수 있다.[22]

그리고 수동 입력소자 및 비릴레이 출력은 유일하게 이름을 부여하고, 릴레이 출력과 해당 접점 입력소자는 함께 동작되므로 동일하게 이름을 부여한다.

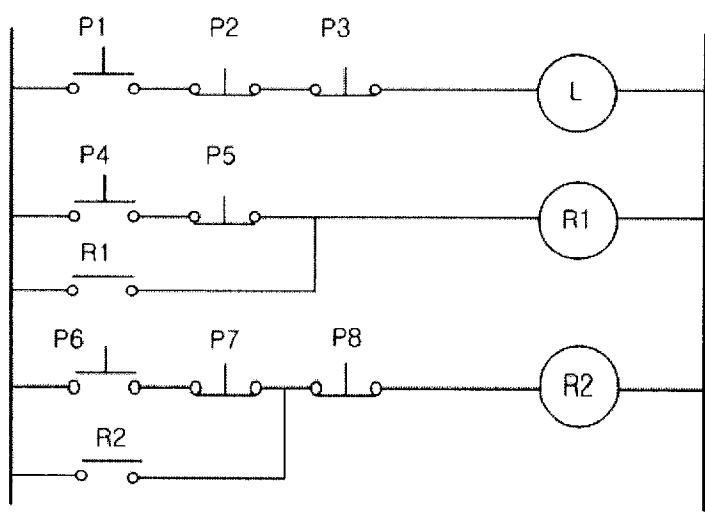


그림 5. 릴레이 회로의 예

그림 5에서 P1에서 P8까지의 입력소자는 수동 입력소자이고, R1의 a 접점, R2의 a 접점과 b 접점 등은 접점 입력소자이며, L은 비릴레이 출력이고, R1과 R2는 릴레이 출력이다.

정의 2) 릴레이 회로에서 출력을 동작시키는 입력소자(들)의 구성을 출력에 대한 입력조건이라 하고, 입력조건을 부울식으로 표현할 때는 a 접점형의 입력소자는 입력소자명을 그대로 사용하고, b 접점형의 입력소자는 입력소자명에 보수를 취하여 사용하고, 직렬 입력소자들은 논리 AND로, 병렬 입력소자들은 논리 OR로 한다.

예를 들어 그림 5에서 각 출력의 입력조건을 정의 2에 따라 구하면 다음과 같다. 첨자 i는 입력조건임을 나타낸다.

$$Li = P1 \cdot P2' \cdot P3' \quad [\text{식 } 2]$$

$$R1i = P4 \cdot P5' + R1 \quad [\text{식 } 3]$$

$$R2i = (P6 \cdot P7' + R2) \cdot P8' \quad [\text{식 } 4]$$

정의 3) 릴레이 회로의 출력 상태를 동작 상태로 하기 위한 입력소자(들)의 동작조건을 출력 동작조건이라 하며, 해제 상태로 하기 위한 입력소자(들)의 동작조건을 출력 해제조건이라 한다.

릴레이 회로는 입력조건과 출력으로 구성되며, 출력 동작조건이 만족되면 입력소자(들)가 출력에 전원을 공급하여 출력

상태는 동작 상태로 되고, 출력 해제조건이 만족되면 입력소자(들)가 전원 공급을 차단함으로써 출력 상태는 해제 상태로 된다.

정리 1) 릴레이 회로에서 출력 동작조건은 입력조건에서 현재 출력 상태를 해제 상태로 하여 구하고, 출력 해제조건은 입력조건에서 출력 상태를 동작 상태로 하여 구한 후에 부정을 취하여 구한다.

증명) 정의 2에 의하여 입력조건은 출력을 동작시키기 위한 입력소자(들)의 구성이며, 출력 동작조건은 출력 상태가 해제된 상태에서 그 적용이 유효하다. 따라서 출력 상태를 해제 상태로 한 입력조건은 출력을 동작시키게 되므로 출력 동작조건이 된다. 그리고 출력 해제조건은 출력 상태가 동작된 상태에서 그 적용이 유효하며, 출력이 동작되지 않는, 즉 출력 동작조건이 만족되지 않음을 의미한다. 따라서 출력 상태를 동작 상태로 한 입력조건에 부정을 취하게 되면 출력 해제조건이 된다. 그림 5에서 출력들의 각 입력조건에서 출력 상태를 해제 상태로 하면, 즉 식 2에서 R1 값에 0을, 식 3에서 R2 값에 0을부여하여 출력 동작조건을 구하면 다음과 같다. 첨자 g는 출력 동작조건임을 나타낸다.

$$Lg = P1 \cdot P2' \cdot P3' \quad \text{[식 5]}$$

$$R1g = P4 \cdot P5' \quad \text{[식 6]}$$

$$R2g = P6 \cdot P7' \cdot P8' \quad [\text{식 7}]$$

출력 동작조건의 각 항은 출력 상태를 동작 상태로 한다. 또한 입력소자(들)의 구성에서 출력 자신의 a 접점을 포함하는 부분은 출력 동작조건에 기여하지 못하며, 출력 자신의 b 접점은 고려되지 않는다. 따라서 입력소자(들)의 구성에서 출력 자신의 a 접점을 제거하였을 때 출력 상태를 동작 상태로 하는 모든 경우가 출력 동작조건이 된다.

그리고 그림 5에서 출력들의 각 입력조건에서 출력 상태를 동작 상태로 하여 보수를 취하면, 즉 식 3에서 R1 값에 1을, 식 4에서 R2 값에 1을 부여하고 부정을 취하여 출력 해제조건을 구하면 다음과 같다. 첨자 d는 출력 해제조건임을 나타낸다.

$$Ld = P1' + P2 + P3 \quad [\text{식 8}]$$

$$R1d = 0 \quad [\text{식 9}]$$

$$R2d = P8' \quad [\text{식 10}]$$

식 9와 같이 조건식이 0이 되는 경우는 출력을 해제시키는 회로가 존재하지 않는 경우이다. 그림 5는 릴레이 회로의 일부분으로, 식 5의 출력 동작 조건에 의하여 R1은 동작되며 동작된 이후에는 R1의 a 접점으로 자기 유지가 되므로 이 예에서는 출력을 해제시킬 수가 없는 것이다. 실제 릴레이 회로에서는 다른 부분에서 R1의 동작을 해제시키는 부분을 포함하고

있다.

출력 해제조건을의 각 항은 출력 상태를 해제 상태로 한다. 또한 입력소자(들)의 구성에서 출력 자신의 b 접점을 포함하는 부분은 출력 해제조건에 기여하지 못하며, 출력 자신의 a 접점은 고려되지 않는다. 따라서 입력소자(들)의 구성에서 출력 자신의 b 접점은 제거하고 출력 자신의 a 접점을 연결된 상태로 하였을 때 출력을 해제시키는 모든 경우가 출력 해제조건이 된다.

보조 정리 1-1) 릴레이 회로에서 출력의 입력조건에 출력 자신이 포함되지 않거나 비릴레이 출력은 입력조건에서 다음과 같이 출력 동작조건과 출력 해제조건을 구할 수 있다.

① 입력조건에 출력 자신이 포함되지 않은 경우에는 입력조건이 출력 동작조건으로 되며, 입력조건을의 부정이 출력 해제조건으로 된다.

② 단독의 비릴레이 출력인 경우 : 출력 동작조건은 입력조건으로, 출력 해제조건은 입력조건을의 부정으로 구한다.

증명) ①, ② 항의 증명 : 정리 1에 의하여 타당하다.

예를 들어 식 2는 출력 L에 대한 입력조건식 안에 자기 자신을 포함하지 않는 램프와 같은 단독의 비릴레이 출력이라 할 수 있다. 이 경우 보조 정리1-1의 ② 항에 의해 입력조건으로 출력 동작조건을 구하면 식 5와 같고, 입력조건을의 부정으로

식 8과 같은 출력 해제조건을 구할 수 있다.

릴레이 회로에서 출력의 입력조건이 다른 출력의 입력조건을 부분으로 포함하는 경우에는 출력의 출력 동작조건과 출력 해제조건을 간소화할 수 있다.

정리 2) 릴레이 회로 Y의 입력조건이 다른 릴레이 회로 X의 입력조건을 부분으로 포함하는 경우, X의 출력을  $X_o$ , X의 출력 해제조건을  $X_d$ 라 하고, Y의 입력조건에서 X의 입력조건을 제외하였을 때의 출력 동작조건을  $Y_{pg}$ , 출력 해제조건을  $Y_{pd}$ 라 하면, Y의 출력 동작조건  $Y_g$ 와 출력 해제조건  $Y_d$ 는 다음과 같다.

$$Y_g = X_o \cdot Y_{pg} \quad \text{[식 11]}$$

$$Y_d = X_d + Y_{pd} \quad \text{[식 12]}$$

증명) X의 입력조건은 항상 Y의 입력조건에 선두에 위치한다. 왜냐하면 X의 입력조건이 선두에 위치하지 않으면 Y의 입력조건이 다른 입력조건으로 변경되기 때문이다. 그리고 Y가 동작되기 위해서는 X가 우선적으로 동작해야 한다. 따라서 Y의 출력 동작조건은 식 11로 충분하다. 또한 X의 출력 해제조건이 만족되는 경우에는 Y도 동작하지 않게 되므로 Y의 출력 해제조건은 식 12로 충분하다.

#### 4. 조건 아크의 도입

릴레이 회로의 입력소자들은 자신의 상태를 유지한 채로 출력을 동작시키는데 기여한다. 이러한 점점들의 상태를 표현하기 위하여 EMFG에 새로운 아크를 도입한다.

정의 4) EMFG에서 트랜지션  $t_n$ 에 입력 아크로 연결된 점선 아크를 조건 아크(Condition Arc)라 하고,  $t_n$ 에 조건 아크로 연결된 입력 박스  $b_m$ 에는 마크가 있어야  $t_n$ 의 점화조건이 만족되며,  $t_n$ 가 점화하였을 때  $b_m$ 의 마크 상태는 변화하지 않는다.

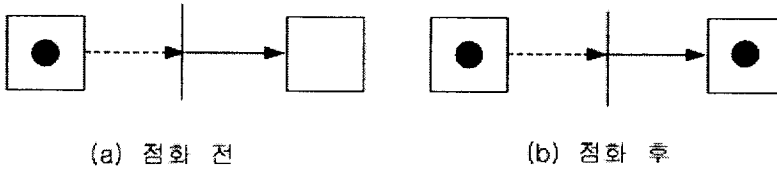


그림 6. 조건 아크의 표현

조건 아크로 연결된 박스는 트랜지션의 점화조건만 만족시키고 연결된 트랜지션의 점화에 의해 자신의 마크 상태는 변화되지 않으므로 어떤 상태를 변화시키는 게이트 역할을 한다.

자기보존 아크(self arc; 박스와 트랜지션 사이에서 출력 일반 아크와 입력 일반 아크로 연결되어 있는 두 아크를 말함)에 연결되어 있는 박스에는 마크가 있어야 트랜지션의 점화조건을 만족시키고, 트랜지션이 점화하였을 때 박스의 마크 상태

는 변화되지 않는다. 이런 점에서 조건 아크는 자기보존 아크의 성질과 동일하다. 그러나 박스에 출력 역 아크가 연결되어 있는 EMFG에서는 그 동작이 서로 다르다. 예를 들어 그림 7에서 박스 b1, b2, b3에 마크가 존재하여 트랜지션 t1, t2, t3이 동시에 점화하는 경우, 조건 아크가 있는 그림 6의 박스 b1의 마크는 소멸하지만, 자기보존 아크가 있는 박스 b2 마크는 소멸하지 않고 유지된다.

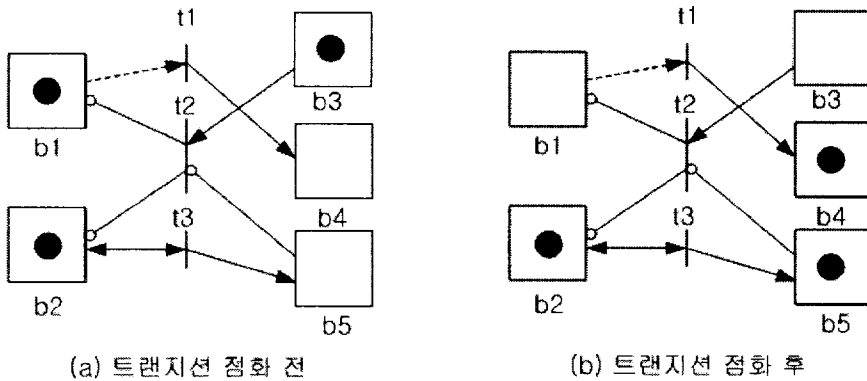


그림 7. 조건 아크와 자기보존 아크가 있는 EMFG의 예

정의 5) EMFG에서 박스  $b_m$ 에 연결된 트랜지션  $t_n$ 가 점화하였을 때,  $b_m$ 에 마크를 생성시킨다면  $t_n$ 을  $b_m$ 의 생성 트랜지션이라 하고,  $b_m$ 의 마크를 소멸시킨다면  $t_m$ 을  $b_m$ 의 소멸 트랜지션이라 한다.

그림 6에서 트랜지션 t1과 t3가 점화하여 박스 b4와 b5에 마크가 생성되므로 트랜지션 t1은 박스 b4의 생성 트랜지션이

되고,  $t_3$ 은  $b_5$ 의 생성 트랜지션이 된다. 또한 트랜지션  $t_2$ 가 점화하여 박스  $b_1$ 의 마크가 소멸하므로 트랜지션  $t_2$ 는 박스  $b_1$ 의 소멸 트랜지션이 된다.

## 5. 릴레이 회로의 EMFG 변환

### 5.1 릴레이 회로의 EMFG 표현

시퀀스 제어 회로를 릴레이 회로로 구현하는 경우에는 많은 경험의 필요할 뿐 아니라 설계된 릴레이 회로는 각 릴레이 접점들이 동작되는 상황을 순서적으로 파악하면서 해석해야 하므로 그 분석이 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 EMFG 이론을 도입하여 설계된 릴레이 회로를 EMFG로 변환하여 표현함으로써 릴레이 회로의 동작과 분석이 용이하고 분석된 내용이 설계에 반영되도록 한다.

릴레이 회로를 EMFG로 변환할 때는 릴레이 회로 소자의 동작 및 릴레이 회로의 동작 상태 등이 EMFG 이론에 어긋나지 않도록 해야 한다.

정리 3) 릴레이 회로의 입력소자 및 출력은 EMFG에서 박스로 변환되고, 동작 상태는 박스의 마크 상태로 표현된다.

증명) 릴레이 회로에서 입력소자의 동작 상태는 동작된 상태와 동작되지 않은 상태로 구분되고, 출력 상태는 동작 상태와 해제 상태로 구분된다. 또한 EMFG에서 박스는 마크 유무로서 이를 표현할 수 있으므로 정리는 타당하다.

입력소자가 동작하거나 출력 상태가 동작 상태인 것은 대응되는 박스에 마크가 존재함을 의미하고, 입력소자가 동작하지

않거나 출력 상태가 해제 상태인 것은 대응되는 박스에 마크가 존재하지 않음을 의미한다.

그런데 입력 수동 소자는 다른 입력소자의 동작이나 출력 상태에 의해 영향을 받지 않으므로 소스 박스(source box)로 변환되고, 비릴레이 출력은 입력소자(들)의 상태에만 영향을 받고 다른 출력에는 영향을 주지 못하므로 싱크 박스(sink box)로 표현된다.

그러나 릴레이 출력은 입력소자(들)에 영향을 받을 뿐 아니라 해당 릴레이 접점들은 접점 입력소자들이 되어 다른 출력에도 영향을 줄 수 있다. 즉 릴레이 출력 상태가 동작 상태가 되면 해당 릴레이 접점들은 동작(a 접점은 닫힌 상태, b 접점은 열린 상태)되고, 해제 상태가 되면 해당 릴레이 접점들은 동작되지 않아(a 접점은 열린 상태, b 접점은 닫힌 상태) 다른 출력을 동작시키는데 기여할 수 있게 된다. 따라서 릴레이 출력 및 접점 입력소자가 되는 해당 릴레이 접점들은 동일한 박스로 표현된다.

릴레이 회로의 출력 동작조건과 출력 해제조건은 출력에 영향을 주므로 이를 EMFG로 변환할 수 있다.

정리 4) 릴레이 회로에서 출력에 대한 출력 동작조건과 출력 해제조건은 다음과 같이 구성되는 EMFG의 트랜지션으로 변환된다.

① 출력 동작조건과 출력 해제조건을 구성하는 입력소자는

트랜지션의 입력 박스로 변환되고, 해당 출력은 트랜지션의 출력 박스로 변환된다.

② 입력소자가 출력 동작조건이나 출력 해제조건에서 동작 상태로서 기여한다면 해당 박스에서 조건 아크로 트랜지션에 연결하고, 동작되지 않은 상태로서 기여한다면 해당 박스에서 역 아크로 트랜지션에 연결한다.

③ 출력 동작/해제조건을 EMFG의 트랜지션으로 변환하는 경우에는 트랜지션에서 일반/역 아크로 출력 박스에 연결한다.

증명) ① 항의 증명 : 정리 5에 의해 자명하다.

② 항의 증명 : 입력소자는 수동 입력소자이거나 점점 입력소자들이므로 스스로 자신의 상태를 변화시키지 못한다. 따라서 입력소자가 동작 상태로서 트랜지션의 점화조건에 기여한다면 당연히 조건 아크로 연결되어야 하고, 동작되지 않은 상태로서 기여한다면 역 아크로 연결되어야 한다.

③ 출력 동작/해제조건이 만족되면 출력 상태를 동작/해제 상태로 한다. 이는 해당 트랜지션이 점화하면 출력 박스에 마크를 생성/소멸시키게 된다. 따라서 정리는 타당하다.

입력조건은 모두 입력 수동 소자이거나 점점 입력소자들로 구성되므로 트랜지션의 입력 아크는 항상 조건 아크이거나 역 아크로서 일반 아크는 사용되지 않는다.

정리 5) 릴레이 회로의 출력 동작/해제조건을 AND-OR 형식

의 부울식으로 표현했을 때, 출력 동작/해제조건의 각 항들은 EMFG의 생성/소멸 트랜지션으로 변환된다.

증명) AND-OR 형식의 부울식으로 표현된 출력 동작/해제조건  
 의 각 항은 출력을 동작/해제시키는 역할을 하므로 EMFG  
 의 생성/소멸 트랜지션으로 표현되는 것은 당연하다.

그림 5의 릴레이 회로에서 모든 입력소자 및 출력들을 소문  
 자로 표기되는 EMFG의 박스로 변환하고, 식 5와 식 6 및 식  
 7의 출력 동작조건을 사용하여 생성 트랜지션을 구하고, 식 8  
 과 식 9 및 식 10의 출력 해제조건을 사용하여 소멸 트랜지션  
 을 구한 후, EMFG로 표현하면 그림 8과 같다.

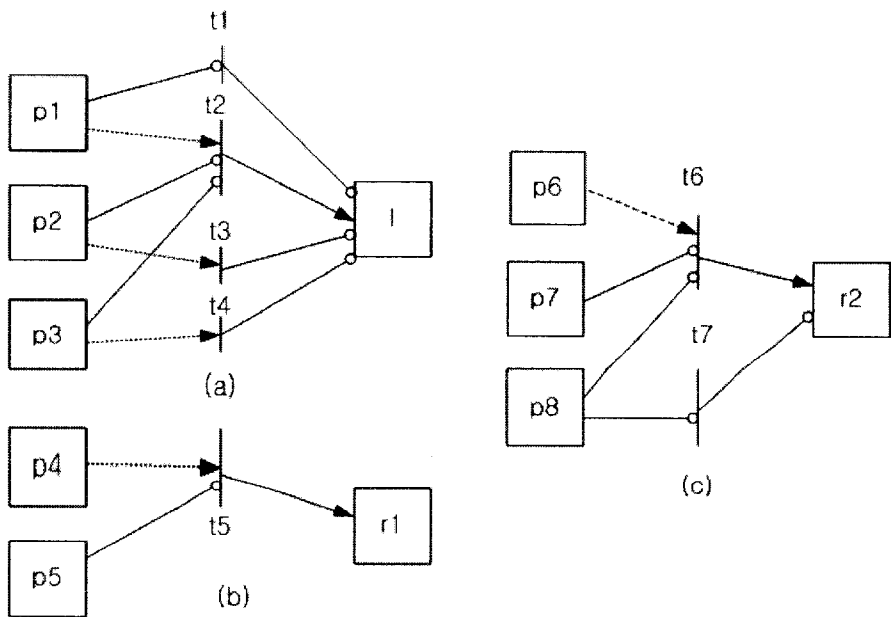


그림 8. 그림 5의 릴레이 회로를 변환한 EMFG

그림 8에서 출력 동작조건식 식 5, 6, 7에 의해 트랜지션에서 박스로 일반 아크로 연결된 트랜지션 t2, t5, t6은 모두 생성 트랜지션이 되고, 출력 해제조건식 식 8, 10에 의해 트랜지션에서 박스로 역 아크로 연결된 트랜지션 t1, t3, t4, t7은 모두 소멸 트랜지션이 된다.

## 5.2 타이머를 포함하는 릴레이 회로의 변환

온 타이머와 오프 타이머는 설정 시간에 따라 동작하므로 EMFG로 변환될 때 다르게 변환되어야 한다.

정리 6) 온 타이머와 오프 타이머는 다음과 같이 EMFG로 변환한다.

① 온 타이머의 EMFG 변환 : 부울식으로 표현한 온 타이머의 출력 동작조건의 각 항을 온 타이머의 설정시간을 가진 생성 트랜지션으로 변환하고, 부울식으로 표현한 출력 해제조건을 각 항을 소멸 트랜지션으로 변환한다.

② 오프 타이머의 EMFG 변환 : 부울식으로 표현한 오프 타이머의 출력 동작조건의 각 항을 생성 트랜지션으로 변환하고, 부울식으로 표현한 출력 해제조건의 각 항을 오프 타이머의 설정시간을 가진 소멸 트랜지션으로 변환한다.

증명) ① 항의 증명 : 온 타이머는 출력 동작조건이 만족되어 타이머 릴레이가 여자된 후 설정시간이 경과하여야 해당 점점들이 동작하고, 출력 해제조건이 만족되어 타이머 릴레이가 소

자되는 즉시 해당 접점들이 동작되지 않은 초기 상태로 되돌아간다. 따라서 출력 동작조건이 변환된 생성 트랜지션의 점화조건이 만족되어 설정시간이 경과한 후에 점화가 완료되도록 하여야 할 것이며, 출력 해제조건이 변환된 소멸 트랜지션은 점화조건이 만족되는 즉시 점화하도록 하여야 한다.

② 항의 증명 : 오프 타이머는 출력 동작조건이 만족되어 타이머 릴레이가 여자되는 즉시 해당 접점들이 동작하고, 출력 해제조건이 만족되어 타이머 릴레이가 소자된 후 설정시간이 경과하여야 해당 접점들이 동작되지 않은 초기 상태로 되돌아간다. 따라서 출력 동작조건이 변환된 생성 트랜지션은 점화조건이 만족되는 즉시 점화하도록 해야 하고, 출력 해제조건이 변환된 트랜지션은 점화조건이 만족되어 설정시간이 경과한 후에 점화가 완료되도록 하여야 한다.

### 5.3 EMFG 변환 단계

지금까지의 정의와 정리들에 기초하여 다음의 정리 7의 알고리즘들을 사용하여 단계적으로 릴레이 회로를 EMFG로 변환할 수 있다.

정리 7) 다음은 릴레이 회로를 EMFG로 변환하는 알고리즘이다.

단계 1 : 릴레이 회로에서 모든 입력소자 및 모든 출력을 각각 박스로 변환한다.

단계 2 : 릴레이 회로에서 각 출력에 대한 출력 동작조건과 출력 해제조건을 정리 1과 보조 정리 1-1을 사용하여 구한다.

이때 간소화 가능한 경우는 정리 3을 이용하여 간소화한다.

단계 3 : 정리 4와 정리 5 및 정리 6을 사용하여 출력 동작 조건들은 생성 트랜지션으로 변환하고, 출력 해제조건들은 소멸 트랜지션으로 변환한다.

증명) 각 정리들에서 증명되었으므로 정리는 타당하다.

이렇게 변환된 EMFG의 동작을 분석하는 것은 릴레이 회로의 동작을 분석하는 것과 동일한 효과를 가진다. 더구나 EMFG의 동작 알고리즘을 사용하면 수학적으로 EMFG를 분석할 수 있기 때문에 더욱 더 릴레이 회로의 분석이 쉬워진다.

## 6. 응용 예

타이머 릴레이를 포함한 릴레이 회로의 EMFG 변환하는 과정을 다음과 같은 교통 신호등 시스템에 적용시켜 보도록 한다.

### 6.1 교통 신호등의 동작과 회로

램프 2개(L1~L2)를 교대로 점등시키는 신호등 회로의 일 예이다. 그림 7에서 BS를 누르면 X1이 동작하여 L1이 점등하고 D1이 여자된다. D1의 설정시간이 경과하면 X2가 동작한다. X2의 동작으로 X1이 복구되고, X1의 복구로 L1이 소등되고, D1이 복구된다. 또한 L2가 점등하며 D2가 여자된다. 이후 D2의 설정시간이 경과하면 X1이 다시 동작하여 위의 동작들을 반복하며 L1과 L2 램프가 설정시간 간격으로 교대로 점등·소등된다.[21]

### 6.2 교통 신호등 시스템 릴레이 회로의 EMFG 변환

그림 9는 위와 같은 동작을 하는 교통 신호등 시스템 릴레이 회로이다. 릴레이 회로의 EMFG 변환 단계에 따라 그림 9의 릴레이 회로를 해당 EMFG로 변환하기로 한다.

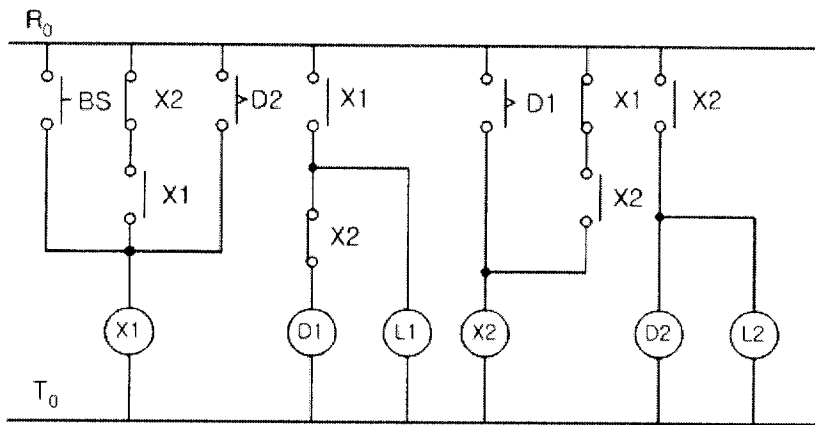


그림 9. 교통 신호등 시스템의 릴레이 회로

단계 1: 그림 9의 릴레이 회로에서 모든 입력소자(수동·접점 입력소자) 및 모든 출력(릴레이 출력, 비릴레이 출력)을 각각 박스로 표현한다.

수동 입력소자

: BS → bs

BS은 시스템을 동작시키기 위한 수동 입력소자이다,

릴레이 출력

: X1, X2, D1, D2 → x1, x2, d1, d2

x1, x2는 일반 릴레이 역할의 릴레이 출력이다. d1, d2는 타이머 릴레이이며 이들은 정리 3에 의하여 트랜지션으로 변환된다.

비릴레이 출력

:  $L1, L2 \rightarrow l1, l2$

$L1$ 은 적색,  $L2$ 는 청색의 표시등 역할의 비릴레이 출력이다.

단계 2: 릴레이 회로에서 각 출력에 대하여 정리 1과 보조 정리 1-1을 이용하여 첨자  $i$ 의 입력조건에서 첨자  $g$ 의 출력 동작조건과 첨자  $d$ 의 출력 해제조건을 구하면 다음과 같다.

입력조건식 :

$$X1i = BS + X2' \cdot X1 + D2$$

$$X2i = D1 + X1' \cdot X2$$

$$D1i = X1 \cdot X2' \qquad D2i = X2$$

$$L1i = X1 \qquad L2i = X2$$

위에서 구한 입력조건식에서 출력 동작조건과 출력 해제조건을 구하면 다음과 같다.

출력 동작조건 :

$$X1g = BS + D2 \qquad X2g = D1$$

$$D1g = X1 \cdot X2' \qquad D2g = X2$$

$$L1g = X1 \qquad L2g = X2$$

출력 해제조건 :

$$X1d = BS' \cdot X2 \cdot D2' \quad X2d = D1' \cdot X1$$

$$D1d = X1' + X2 \quad D2d = X2'$$

$$L1d = X1' \quad L2d = X2'$$

단계 3: 단계 2에서 구한 출력 동작조건과 출력 해제조건을 정리 4와 정리 5를 사용하여 각각 생성 트랜지션과 소멸 트랜지션으로 변환하여 전체적인 EMFG로 표현하면 그림 10과 같다.

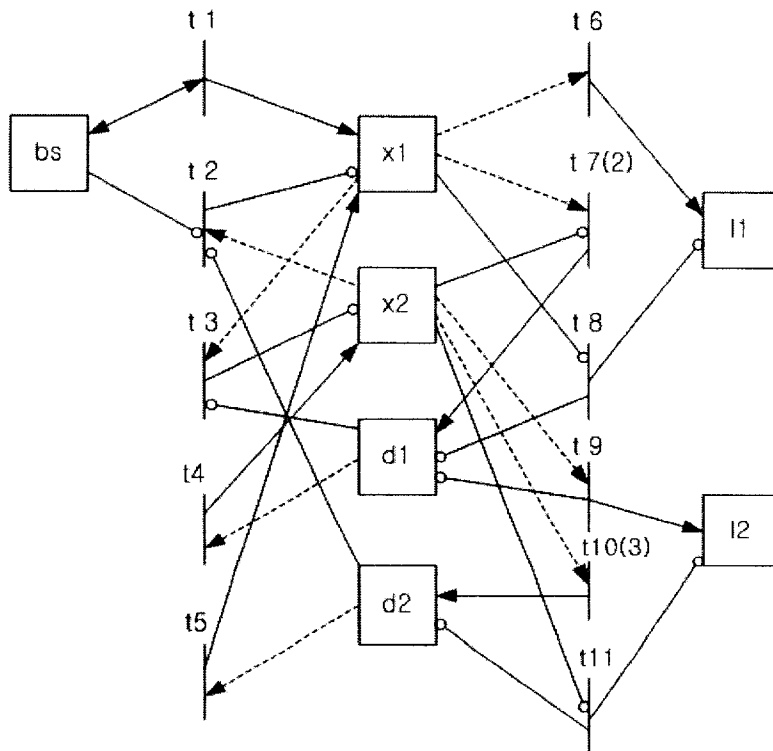


그림 10. 교통 신호등 시스템의 EMFG

### 6.3 변환된 EMFG의 동작 분석

그림 10의 EMFG는 초기에 어떠한 박스에도 마크가 존재하지 않는 상태에서 다음과 같이 동작된다.

\* BS 버튼을 누름(bs1 마크 생성) :

① t1, t8, t11 점화 → x1 마크 생성

② t3, t6, t11 점화 → x1, l1 마크 생성(L1 램프 점등)

③ t3, t6, t7, t11 점화 → x1, l1, d1 마크 생성 - D1의 동작

④ t4, t6, t11 점화 → x1, l1, d1, x2 마크 생성

⑤ t2, t4, t6, t9 점화 → x1, d1 마크 소멸 l1, x2, l2 마크 생성

(L2 램프 점등)

⑥ t2, t8, t9 점화 → l1 마크 소멸 x2, l2 마크 생성

(L1 램프 소등)

⑦ t2, t8, t9, t10 점화 → x2, l2, d2 마크 생성 - D2의 동작

⑧ t5, t8, t9 점화 → x2, l2, d2, x1 마크 생성

⑨ t3, t5, t6, t9 점화 → x2, 마크 소멸 l2, d2, x1, l1 마크 생성

(L1 램프 점등)

⑩ t3, t5, t6, t11 점화 → l2, d2, 마크 소멸 x1, l1 마크 생성

(L2 램프 소등)

이와 같이 BS 버튼을 한번 눌러서 시스템을 가동시킨다. 그런 다음 X1과 X2 릴레이를 이용하여 램프 L1과 L2를 동작시키고, 타이머 D1, D2의 설정 시간을 주기로 X1, X2 릴레이를 동작 또는 동작 해제시켜서 반복·주기적으로 램프들을 점등/

소등시킨다.

#### 6.4 수치 시물레이션

EMFG가 동작된다는 것은 이에 대응되는 시스템이 동작된다는 뜻이다. 즉 시간경과에 따라 박스들의 마크상태가 변화하는 것을 의미하고 시스템의 상태가 변화하는 것을 의미한다. 이러한 마크상태의 변화를 수학적으로 판단하고 계산하는 알고리즘을 통해 위 응용 예의 릴레이 회로가 EMFG로 정확하게 변환되었는지 또한 시스템이 올바르게 작성되었는지를 검증할 수 있다.

[17] 그림 10의 EMFG에 대한 동작해석을 다음의 절차를 통해 확인할 수 있다.

단계 1 (초기화 과정)

##### ① 마킹시간

$$t_m = G.C.M( 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 3, 1 ) = 1$$

##### ② 초기완료비 벡터

$$\begin{aligned} V_0 &= [ 1/1 \quad 1/1 \quad 1/1 \quad 1/1 \quad 1/1 \quad 1/1 \quad 2/1 \quad 1/1 \quad 1/1 \quad 3/1 \\ &\quad 1/1 ] \\ &= [ 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 2 \quad 1 \quad 1 \quad 3 \quad 1 ] \end{aligned}$$

③ 입력행렬( $T_i$ ) :

표 1. 입력행렬( $T_i$ )

|    | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 | t6 | t7 | t8 | t9 | t10 | t11 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| bs | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| x1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| x2 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| d1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| d2 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| l1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| l2 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |

④ 출력행렬( $T_o$ ) :

표 2. 출력행렬( $T_o$ )

|    | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 | t6 | t7 | t8 | t9 | t10 | t11 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| bs | 11 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| x1 | 11 | -1 | 0  | 0  | 11 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| x2 | 0  | 0  | -1 | 11 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| d1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 11 | -1 | -1 | 0   | 0   |
| d2 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 11  | -1  |
| l1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 11 | 0  | -1 | 0  | 0   | 0   |
| l2 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 11 | 0   | -1  |

⑤ 접속행렬( $T_b$ ) :

표 3. 접속행렬( $T_b = T_o - T_i$ )

|    | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 | t6 | t7 | t8 | t9 | t10 | t11 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| bs | 10 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| x1 | 11 | -1 | 0  | 0  | 11 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| x2 | 0  | 0  | -1 | 11 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   |
| d1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 11 | -1 | -1 | 0   | 0   |
| d2 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 11  | -1  |
| l1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 11 | 0  | -1 | 0  | 0   | 0   |
| l2 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 11 | 0   | -1  |

⑥ 점화조건 행렬( $C$ ) :

표 4. 점화조건 행렬( $C$ )

|    | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 | t6 | t7 | t8 | t9 | t10 | t11 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| bs | 1  | 0  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X   | X   |
| x1 | X  | X  | 1  | X  | X  | 1  | 1  | 0  | X  | X   | X   |
| x2 | X  | 1  | X  | X  | X  | X  | 0  | X  | 1  | 1   | 0   |
| d1 | X  | X  | 0  | 1  | X  | X  | X  | X  | X  | X   | X   |
| d2 | X  | 0  | X  | X  | 1  | X  | X  | X  | X  | X   | X   |
| l1 | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X   | X   |
| l2 | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X   | X   |

⑦ 초기마크벡터( $M_0$ ) :

$$M_0 = [ 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 ]$$

단계 2 (점화가능벡터[17] 구함)

다음의 식을 이용하여 구한다.

$$F_k = M_{k-1} \blacksquare C$$

$$F_1 = M_0 \blacksquare C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]$$

단계 3 (예상완료비 벡터[17] 구함)

k가 1인 경우는 초기완료비  $V_0$ 로 하고, k가 2 이상인 경우는  $V_k$ 는 경과완료비  $X_{k-1}$ 에서 0 이하의 모든 원소를 초기완료비로 대치하여 구한다.

$$V_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1 \ 3 \ 1]$$

단계 4 (현완료비 벡터[17] 구함)

다음의 식을 이용하여 구한다.

$$W_k = F_k * V_k$$

$$W_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]$$

단계 5 (경과완료비 벡터[17] 구함)

다음의 식을 이용하여 구한다.

$$X_k = W_k - 1$$

$$X_1 = [0 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 0 \ -1 \ -1 \ 0]$$

단계 6 (점화완료 벡터[17] 구함)

$X_k$ 에서 0인 원소는 1로 대체하고, 0이 아닌 모든 원소는 모두 1로 대체하여 구한다.

$$Y_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]$$

단계 7 (박스들의 마킹평가)

다음의 식을 이용하여 구한다.

$$M_k = L(M_{k-1} + Y \cdot T_b^T)$$

위의 식을 이용하여  $M_1$ 을 구하면 다음과 같다.

$$M_k = [bs, x1, x2, d1, d2, l1, l2]$$

$$M_1 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

그림 9의 릴레이 회로에서도 알 수 있듯이 BS 입력을 한번 눌렀다가 떼는 동작을 통해 이 시스템이 정상 동작함을 알 수 있다. 그래서 위의 단계들로 구해진 마크벡터  $M_1$ 에 대해서도 수동으로 bs의 마크를 해제시켜 주어야 하므로  $M_1$ 은 다음과 같이 변경한다.

$$M_1 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

마지막으로 단계 2에서 단계 7의 과정을 반복하면서 각 항목을 구하면 표 7과 같은 결과를 얻을 수 있고, 마크벡터 M에 대한 변화를 통해 시스템이 정상적으로 작동하는지를 판단할 수 있다.

그림 9의 교통 신호등 시스템의 릴레이 회로는 두 개의 타이머 릴레이를 통해 램프 두 개가 교대로 점등·소등되는 동작이 순환되고 있다. 변환된 EMFG에 대한 동작 알고리즘의 결과표인 표 7에서 마크벡터(M)의 단계별 변화를 조사하면 정상 동작하는지 바로 확인할 수 있다.

표 5. 동작 알고리즘의 결과표

|    | F                       | V                       |
|----|-------------------------|-------------------------|
| 0  |                         | [1 1 1 1 1 1 2 1 1 3 1] |
| 1  | [1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1] | [1 1 1 1 1 1 2 1 1 3 1] |
| 2  | [0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1] | [1 1 1 1 1 1 2 1 1 3 1] |
| 3  | [0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1] | [1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 1] |
| 4  | [0 0 0 1 0 1 1 0 0 0 1] | [1 1 1 1 1 1 2 1 1 3 1] |
| 5  | [0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0] | [1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 1] |
| 6  | [0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0] | [1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1] |
| 7  | [0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0] | [1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1] |
| 8  | [0 0 0 0 1 0 0 1 1 1 0] | [1 1 1 1 1 1 2 1 1 3 1] |
| 9  | [0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0] | [1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1] |
| 10 | [0 0 1 0 1 1 1 0 0 0 1] | [1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1] |
| 11 | [0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1] | [1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 1] |

|    | W                       | X                               |
|----|-------------------------|---------------------------------|
| 0  |                         |                                 |
| 1  | [1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1] | [0 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0 -1 -1 0] |
| 2  | [0 0 1 0 0 1 2 0 0 0 1] | [-1 -1 0 -1 -1 0 1 -1 -1 -1 0]  |
| 3  | [0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1] | [-1 -1 0 -1 -1 0 0 -1 -1 -1 0]  |
| 4  | [0 0 0 1 0 1 2 0 0 0 1] | [-1 -1 -1 0 -1 0 1 -1 -1 -1 0]  |
| 5  | [0 1 0 1 0 1 0 0 1 3 0] | [-1 0 -1 0 -1 0 -1 -1 0 2 -1]   |
| 6  | [0 1 0 0 0 0 0 1 1 2 0] | [-1 0 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 1 -1]  |
| 7  | [0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0] | [-1 0 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 0 -1]  |
| 8  | [0 0 0 0 1 0 0 1 1 3 0] | [-1 -1 -1 -1 0 -1 -1 0 0 2 -1]  |
| 9  | [0 0 1 0 1 1 0 0 1 2 0] | [-1 -1 0 -1 0 0 -1 -1 0 1 -1]   |
| 10 | [0 0 1 0 1 1 2 0 0 0 1] | [-1 -1 0 -1 0 0 1 -1 -1 -1 0]   |
| 11 | [0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1] | [-1 -1 0 -1 -1 0 0 -1 -1 -1 0]  |

|    | Y                       | M               |
|----|-------------------------|-----------------|
| 0  |                         | [1 0 0 0 0 0 0] |
| 1  | [1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1] | [0 1 0 0 0 0 0] |
| 2  | [0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1] | [0 1 0 0 0 1 0] |
| 3  | [0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1] | [0 1 0 1 0 1 0] |
| 4  | [0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1] | [0 1 1 1 0 1 0] |
| 5  | [0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0] | [0 0 1 0 0 1 1] |
| 6  | [0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0] | [0 0 1 0 0 0 1] |
| 7  | [0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0] | [0 0 1 0 1 0 1] |
| 8  | [0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0] | [0 1 1 0 1 0 1] |
| 9  | [0 0 1 0 1 1 0 0 1 0 0] | [0 1 0 0 1 1 1] |
| 10 | [0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 1] | [0 1 0 0 0 1 0] |
| 11 | [0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1] | [0 1 0 1 0 1 0] |

## 7. 결론

본 논문에서는 시퀀스제어의 릴레이 회로를 설계하는 데 있어 경험의 부족으로 인한 설계오류나 구성요소의 증가로 인한 해석상의 곤란, 시각화와 동작 분석의 어려움을 해결하고, 시퀀스 추이 체크나 이상개소의 검출이 용이하게 하기 위해 릴레이 회로를 EMFG로 변환하였다.

릴레이 회로를 EMFG로 변환하기 위하여 릴레이 회로의 구성요소에 대해 정의하고, 변환하는 단계들에 대한 정리들을 바탕으로 실제 교통 신호등 시스템의 릴레이 회로를 EMFG로 변환을 하였으며, 변환된 EMFG를 동작 해석 알고리즘을 통한 수치 시뮬레이션을 통해 시스템의 동작에 대한 분석도 검증하였다.

또한, 릴레이 회로의 특성에 더욱 적합한 EMFG로 변환하기 위하여 기존의 EMFG에 조건 아크를 도입하였다. 이로 인해 릴레이 회로의 소자들의 동작을 좀 더 정확히 표현할 수 있게 되었다. 그리고 대부분의 릴레이 회로에서 많이 쓰이는 두 종류의 타이머 릴레이에 대한 변환을 EMFG의 시간 트랜지션을 이용하여 정확하게 동작하는 EMFG로 변환을 할 수 있었다.

제안된 방법은 설계 단계에서 검증 단계까지 대단히 정확하고 효과적인 수단을 제공하여 향후 거대하고 복잡한 시스템을 설계·구현할 때 큰 효과를 거둘 수 있다. EMFG의 동작 해석 알고리즘을 이용하면 설계된 릴레이 회로의 동작 분석이나 오

류 검색시에 더욱 큰 효과를 확인할 수 있으며 릴레이 회로의 설계에 기여할 수 있을 것으로 기대 된다.

향후 연구 과제로는 보다 다양한 릴레이 회로의 소자들에 대한 EMFG 변환과 설계된 회로에서 고장의 원인을 분석해 내는 방법을 구하는 것이다.

## 참고문헌

- [1] Tomohiro Murata, Norihisa Komoda, Kunikai Matsumoto and Koichi Haruna, "A Petri Net-Based Controller for Flexible and Maintainable Sequence Control and its Applications in Factory Automation", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. IE-33, No. 1, FEBRUARY 1986
- [2] T. Murata, "Petri nets: Properties, analysis and applications" Proc. IEEE, vol. 77, NO. 4, pp. 541-580, APRIL 1989
- [3] RENE DAVID and HASSANE, "Petri Nets for Modeling of Dynamic Systems-A Survey", Automatica, vol 30, No. 2, pp. 175-202, 1994
- [4] Saïid Laftit, Jean-Marie Proth and Xiao-Lan Xie, "Optimization of Invariant Criteria for Event Graph", IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 37, NO. 5, MAY 1992
- [5] HERVE P. HILLION and JEAN-MARIE PROTH, "Performance Evaluation of Job-Shop Systems Using Timed Events-Graphs", IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 34, NO. 1, JANUARY 1989
- [6] 이해기, "시이퀀스 제어 및 PLC 제어", 光明, 1997
- [7] 강신한, 김광만, 이재원, "PLC 래더다이아그램 생성을 위한 지식기반시스템에 관한 연구", 공업경영학회 논문지, Vol. 17 No. 30, 1994. 5, p153-160

- [8] 강신한, 신흥렬, 이재원, “PLC 자동프로그래밍을 위한 지식기반의 어드레스 할당 후처리부에 관한 연구”, 한국공업경영학회 논문지 Vol. 19 No.37, 1996. 3, p171-178
- [9] 천성욱, 강순주, 서대화, “PLC를 적용한 실시간 시스템의 가상 프로토타이핑”, 대한전자공학회 추계학술대회논문집, Vol. 21 No. 2, 1998. 11.
- [10] 김재권 “Relay Ladder Logic을 이용한 시퀀스 제어에 대한 효율적인 Design Recovery 알고리즘에 대한 관한 연구”, 한국과학기술원 석사학위 논문, 1995.12
- [11] 정석권, 양주호, “페트리네트의 구조화를 통한 시퀀스제어계의 모델링”, 한국정밀공학회추계학술대회논문집, 1998. 5, pp.252-257
- [12] 정석권, “페트리네트에 의한 탈팬장치의 시퀀스제어계 모델링”, 한국해양공학회 논문지 Vol. 12 No.4, 1998. 8, p88-91
- [13] 정석권, 양주호, “페트리네트의 계층화를 통한 시퀀스제어계의 설계”, 한국해양공학회 논문지 Vol. 13 No. 3, 1999. 8, p106-115
- [14] 여정모, “마크흐름선도의 확장”, 부산대학교 대학원 석사학위 논문, 1982. 2.
- [15] 여정모, 황창선, “확장된 마크흐름선도와 시퀀셜제어시스템에의 응용”, 부산대학교 공과대학 연구보고 Vol. 25, 1983. 6, p. 209 - 219

- [16] 여정모, “EMFG 회로의 간략화에 관한 연구”, 부산개방 대학 연구보고 Vol. 29., 1987. 12, p. 741 - 760
- [17] 여정모, “이산제어시스템 설계를 위한 확장된 마크흐름 선도의 동작해석”, 정보처리논문지 Vol. 5. No. 7, 1998. 7, p. 1896-1907
- [18] 여정모, “이산 시스템의 설계와 해석을 위한 확장된 마크 흐름선도의 재정의와 회로변환”, 멀티미디어학회 논문지 Vol. 1. No. 2. 1998. 12. p224 - 238
- [19] 여정모, 하재목, “확장된 마크흐름선도의 재구성과 회로 변환”, 한국멀티미디어학회, 1998년도 춘계학술발표논문집, 1998. 6, p. 423 - 431
- [20] 김희정, 백형구, 김종민, 여정모 “이산시스템 설계를 위한 확장된 마크흐름선도의 수학적 해석”, 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 Vol. 5 No. 1, 2001. 5, p692-695
- [21] 김원희 “PLC를 중심으로 한 종합 시퀀스 제어”, 성안당, 1997
- [22] 여정모, 백형구, 김희정 “릴레이 회로의 EMFG 표현에 관한 연구”, 부경대학교 논문집 Vol. 6. 2001. 12, p335-346

## 감사의 글

논문을 쓰는 내내 쉬운 일이 하나도 없더니만 이렇게 마지막 페이지를 채우는 이 순간마저도 정말 어렵습니다. 논문 내용을 작성하는 것처럼 쓰고 지우기를 몇 번이나 했는지 모릅니다. 대학원 원서를 들고 참 많이 망설였던 그 때가 생각납니다. 어떻게 살아야 할 지에 대한 삶의 고민을 여전히 안고는 있지만, 대학이란 곳에서 만난 많은 인연들을 통해 우리의 삶이 풍부해지라 다짐도 해봅니다. 공부를 한다는 것이 얼마나 기쁜 일인지를 일깨워주시고, 따뜻한 인간애로 정을 나누어주신 많은 고마우신 분들에게 부족하나마 이 지면을 빌어 감사의 마음을 전하고자 합니다.

부족한 저에게 학업의 길을 열어 주시고, 그 길을 올바르게 걸어갈 수 있도록 지도해 주신 여정모 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 어느 한 순간도 흔들림 없으시면서 너무나도 자상하신 교수님의 모습을 오래 동안 간직하며 열심히 생활하겠습니다. 또한 학부 시절부터 많은 격려와 가르침을 주시고, 바쁘신 와중에도 저의 논문을 심사해 주신 윤성대 교수님, 김영봉 교수님께도 감사의 마음을 전합니다. 대학(원) 생활을 하는 가운데 많은 가르침을 주신 박만곤 교수님, 정순호 교수님, 박승섭 교수님, 박지환 교수님, 김창수 교수님, 박홍복 교수님, 이경현 교수님께도 감사 드립니다.

자기 논문처럼 챙겨주시고 도와주신 화정이 누나, 항상 걱정해주시며 열심히 공부하시는 김중민 선생님, 같이 생활한 유일한 대학원 선배님이신 홍석 선배에게도 깊은 감사를 드립니다. 그리고 이렇게 논문이 나오기까지 많은 도움을 주신 1년 동안 함께 생활한 산업대학원, 교육대학원 선생님, 또 랩에서 고생이 많은 상봉이와 연호에게도 감사의 마음을 전합니다.

그리고 공부를 시작하게 계기를 만들어 주시고, 함께 동고동락했던 지웅이 선배, 항상 같이 지내며 힘이 되어 주고 격려해 주는 현재 저와 동거 중인 찬희 선배, 삶의 희망을 보여주는 삼룡이 형, 꼼꼼히 잘 챙겨준 덕분에 이렇게 졸업하게 되어 너무 고마운 조교생 미은이에게도 정말 감사 드립니다.

대학 시절의 대부분을 함께 나눴던 나날 가족들, 어린 시절부터 함께 해온 영원한 나의 친구들, 항상 의아해 하면서도 격려해준 동기들 그리고 나의 사랑하는 후배들에게도 감사 드립니다.

언제나 저를 믿어 주시고, 올바른 사람이 되라시던 부모님에게 고개 숙여 감사의 인사를 올립니다. 언제나 당당한 나의 누나, 변함 없이 형을 따라 주는 동생 형관이, 군 생활이 한창으로 접어드는 막내 형민이 그리고 어릴 적부터 저를 아껴주신 사랑하는 고모님들에게도 감사 드립니다.

조금은 편하게 적고 싶었는데.... 주위에 이렇게 생각나고 인사 드려야 할 분이 많다는 것이 제 인생의 가장 큰 행운이 아닐까 생각합니다. 앞으로도 열심히 해서 사회에 도움이 될 수 있는 사람이 되도록 노력하겠습니다. 다시 한번 감사 드립니다. 모두에게... 사랑합니다.

2001년 12월 31일

끝과 새로운 시작의 문턱에서