

직권전동기의 완전한 별도 계자제어를 위한 새로운 2상한 초퍼

New Two-Quadrant Chopper for Complete Decoupled Field Control of DC Series Motor

金 恩 培* · 洪 淳 瓚** · 金 倫 鎬§ · 徐 東 助§§
 (Un-Bae Kim · Soon-Chan Hong · Yoon-Ho Kim · Dong-Jo Seo)

요 약

직권직류전동기의 전기자전류와 계자전류를 완전히 별도로 제어할 수 있을 뿐만 아니라 2상한에서도 동작이 가능한 새로운 2상한 초퍼를 제안하였다. 새로운 초퍼를 구성하기 위하여 생각할 수 있는 모든 경우를 고려한 다음에, 체계적으로 타당성을 검토한 결과 계자를 완전히 별도로 제어할 수 있도록 구성가능한 모든 도전회로를 얻었으며, 이 중에서 선택된 도전회로들로부터 능동스위칭소자를 최소한으로 사용한 2상한 초퍼를 구성하였다. 새로 제안된 초퍼를 사용하면 직권전동기계통에서 전기자전류와 계자전류가 완전히 별도로 제어되며 2상한 동작이 가능함을 디지털 시뮬레이션을 통하여 해석하였고, 이를 실험을 통하여 확인하였다.

Abstract- New chopper circuits for decoupled operation of the dc series motor are presented. These new choppers are capable of controlling field current completely separately, while offering capability of bidirectional armature energy flow. To develop the chopper circuit with minimum number of switching elements, the complete family of possible conduction circuits are systematically investigated. Then one or two quadrant chopper circuits which offer the desired operations are synthesized from the resulting conduction circuits. Finally, the developed chopper circuits are analyzed in the steady state. The details of operation of the chopper circuits are also fully described and experimented.

*正 會 員 : 檀國大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 **正 會 員 : 檀國大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
 §正 會 員 : 中央大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博
 §§正 會 員 : 효성 ABB 技術部 研究員
 接受日字 : 1989年 8月 10日
 1次修正 : 1989年 9月 22日

1. 서 론

직권직류전동기는 기동토크 특성이 좋고 부하에 따라 속도가 증감하여 중부하에서도 전류가 과대하게 흐르지 않으므로, 전기철도, 크레인, 권상

기 등의 운전에 오랫동안 사용되어 왔으나 타여자전동기와는 달리 부하전류가 계자회로에 흐르므로 독립된 계자제어가 어려운 단점이 있다. 반면에 타여자전동기는 독립된 계자제어가 손쉬우므로 효율을 향상시키는 제어알고리즘을 실현한다든가[1] 하는 성능향상을 위한 제어가 용이하다. 또한 직권전동기는 분권전동기와는 달리 기계에너지를 흡수하는 제동기로서 사용될 수 없는 것으로 알려져 있다.[2, 3]

그러나 직권전동기계통에서도 별도의 계자제어가 가능하면 효율 향상을 위한 제어알고리즘이나[4] 속도제어등이 매우 용이해진다. 따라서 계자전류를 전기자전류와 별도로 제어하기 위하여 여러가지 전력회로들이 고안되었으나[5~7] 이 회로들은 계자회로를 분리해야하는등 여러가지 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 Rashid와 Bhadra가 새로운 회로를 제안한 바 있다.[8] 이들이 제안한 회로는 계자회로를 분리하는 단점은 없으나 모우드에 따라 계자전류와 전기자전류의 독립적인 제어가 불가능할 수도 있을 뿐만 아니라 1상환에서만 동작이 가능하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 직권전동기계통에서 계자전류와 전기자전류를 완전히 별도로 제어할 수 있고 연속 모우드로 동작하며, 2상환에 걸쳐 동작하여 회생 제동도 가능한 새로운 2상환초퍼를 제안하고자 한다.

2. 도전회로의 유도

2.1 일반적인 구성도

2상환 초퍼를 구성하기 위하여 도전회로의 모든 경우를 고려하여야 하며 이들로부터 최소한의 스위칭소자를 사용하면서 원하는 제어특성을 갖는 초퍼를 구성해야 한다. 따라서 그림1과 같은 일반적인 구성도를 고려한다.

그림 1의 구성도는 기존의 직권전동기의 세 단자와 직류전원 두 단자 사이에서 전류가 흐를 수 있는 모든 경로를 표시하고 있으며 A~F는 전원선과 직권전동기 사이의 전력수수경로이며 G와 H는 계자회로와 전기자회로의 환류경로이다. 또한 계자전류는 그림 1에서와 같이 정의한다. 전기자전류는 구동운전이나 회생제동이냐에 따라 방향이 다를 수 있다.

A~H의 여덟개의 전류경로는 전류의 흐름에 따라 세가지의 서로다른 모우드를 가진다. 즉, 첫째는 전류가 윗 방향에서 아래 방향으로 흐르는 경

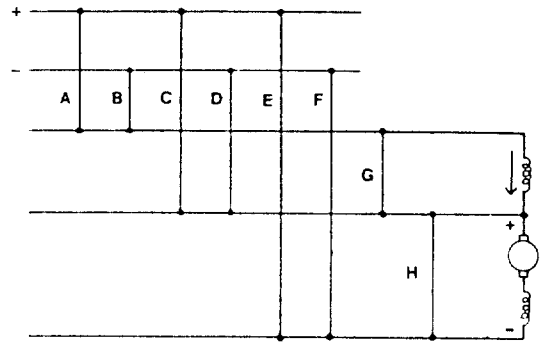


그림 1 직권전동기 운전계통의 일반적인 구성도
Fig. 1 Generalized topology for decoupled dc series motor drive.

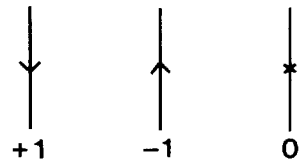


그림 2 전류흐름의 정의
Fig. 2 Definitions of current flow.

우이고 둘째는 전류가 아래 방향에서 윗 방향으로 흐르는 경우이며 셋째는 전류가 흐르지 않는 경우이다. 편의상 이 세가지 모우드를 그림 2와 같이 +1, -1, 0 으로 정의한다.

2.2 사용가능한 도전회로

그림 2의 정의에 따라 생각할 수 있는 모든 도전회로는 전원과 직류전동기를 연결하는 전류경로가 여덟개이므로 3^8 즉 6561가지이다. 이 중에서 우선 다음의 경우가 제외된다.

1) 단락회로가 구성되는 경우—2353 가지

- 예) (a) A = +1 B = -1
- (b) C = +1 H = +1 F = -1
- (c) E = +1 H = -1 D = -1

2) 전원선사이에 회로구성이 불가능한 경우—1705 가지

- 예) (a) B = +1 A = -1
- (b) D = +1 G = -1 A = -1
- (c) F = +1 H = -1 C = -1

3) 전원과 부하가 분리되는 경우(단, 환류회로의 경우는 별도로 고려)—1143가지

- 예) (a) A = +1 B = +1 C = +1
D = +1 E = +1 F = +1
- (b) A = 0 B = 0 C = 0

$D = 0 \quad E = 0 \quad F = 0$
 (c) $A = -1 \quad B = -1 \quad C = -1$
 $D = 0 \quad E = 0 \quad F = 0$

4) 하나의 전원에서 동시에 둘 또는 세 전류가 흐르는 경우—1280가지

(1) 양의 전원선에서

- 예) (a) $A = +1 \quad C = +1 \quad E = -1$
- (b) $A = -1 \quad C = -1 \quad E = 0$
- (c) $A = +1 \quad C = -1 \quad E = -1$

(2) 음의 전원선에서

- 예) (a) $B = +1 \quad D = +1 \quad F = +1$
- (b) $B = -1 \quad D = -1 \quad F = 0$
- (c) $B = +1 \quad D = -1 \quad F = -1$

위의 네 경우는 구성 자체가 불가능한 경우이므로 우선적으로 제외되어야 하며 결국 80가지의 도전회로가 남는다. 앞에서 계자전류와 전기자전압을 그림 1에서와 같이 정의하였고 계자전류와 전기자전류는 연속적이어야 하므로 다음 단계에서는 아래의 경우가 제외되어야 한다.

5) 계자회로의 개방—8가지

- (a) $A = 0 \quad B = 0 \quad G = 0$

6) 계자전류의 방향에 따라—40가지

- (a) $A = -1$
- (b) $B = -1$
- (c) $G = +1$

7) 계자회로로부터의 에너지회생—12가지

- (a) $B = +1$

8) 전기자전압의 극성에 따라—4가지

- (a) $D = +1 \quad E = -1$
- (b) $D = -1 \quad E = +1$

9) 전기자회로의 개방—2가지

- (a) $E = 0 \quad F = 0 \quad H = 0$

전기자와 계자가 동시에 환류되는 경우를 별도로 고려하면 다음의 경우도 제외되어야 한다.

10) 전기자전류와 계자전류가 동시에 환류되는 경우—6가지

이상의 경우들을 제외하면 그림3의 도전회로 1~8이 남으며 도전회로 9와 도전회로 10은 전기자전류와 계자전류가 동시에 환류되는 경우를 별도로 고려한 경우이다.

3. 쇼퍼의 구성

그림 3의 사용가능한 도전회로를 전기자회로와 계자회로의 동작에 따라 분류하면 표1과 같다. 도

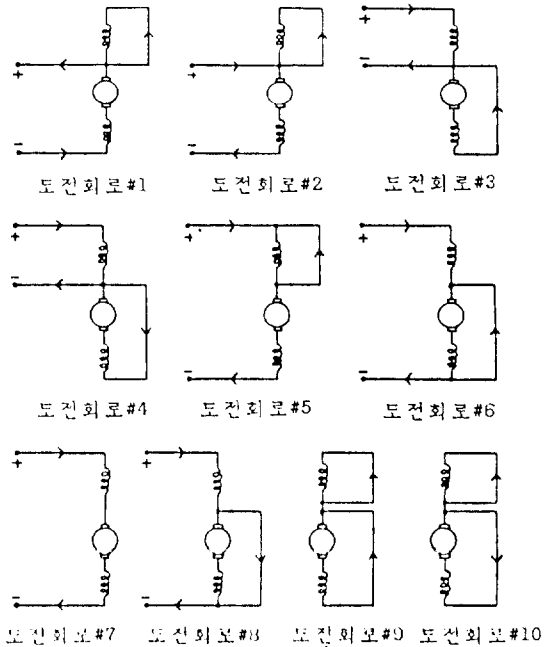


그림 3 사용가능한 10가지 도전회로
 Fig. 3 Ten possible circuit topologies.

표 1 사용가능한 도전회로의 분류
 Table 1 Grouping of all possible conduction circuits.

전기자회로 \ 계자회로	여 자	비여자
모우드 A	도전회로#7	도전회로#2 도전회로#5
모우드 B	도전회로#3 도전회로#6	도전회로#9
모우드 C	도전회로#4 도전회로#8	도전회로#10
모우드 D	없음	도전회로#1

전회로중에서 도전회로 5는 계자전류가 전기자전류보다 클 경우에만 동작이 가능하며 도전회로 6은 반대로 전기자전류가 계자전류보다 클 경우에만 동작이 가능하다. 또한 도전회로 7은 전기자전류와 계자전류의 순시치가 같아야 한다.

본 연구에서는 전기자전류와 계자전류가 완전히 별도로 연속제어될 수 있는 2상한초퍼를 구성하여야 하므로 위와 같은 단점을 지닌 도전회로는 제외한다. 또한, 도전회로 4와 8은 구성은 다르지만 기능이 같은 회로이므로 편의상 도전회로 8을 제외한다. 표2는 나머지 선택된 도전회로의 분류를 나타내고 있다.

표2로부터 1상한초퍼가 구성될 수 있다. 1상한 초퍼는 단순히 모우드 A와 모우드 B의 결합으로 구성될 수 있으며 2상한동작은 모우드 C와 모우드 D의 결합이므로 2상한초퍼는 네가지 모우드를 모두 결합시켜 구성할 수 있다. 1상한초퍼와 2상한 초퍼를 구성하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하여야 한다. 동일한 전원에서 계자와 전기자에 독립적으로 전류가 흐를 수 있는 별도의 전류경로가 구성되어야 하며, 계자와 전기자에 연속전류가 흐를 수 있도록 환류회로를 구성하여야 한다. 이 상으로부터 1상한초퍼와 2상한초퍼를 구성하면 그림 4, 그림 5와 같다.

그림 4의 1상한초퍼는 네개의 능동스윗칭소자와

표 2 선택된 도전회로의 분류

Table 2 Grouping of selected conduction circuits.

모우드	계 자	어 자	비 어 자
A		없 음	도전회로 #2
B	도전회로 #3		도전회로 #9
C	도전회로 #4		도전회로 #10
D	없 음	있 음	도전회로 #1

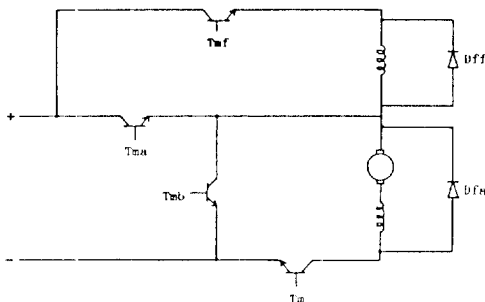


그림 4 1상한 초퍼
Fig. 4 One quadrant chopper.

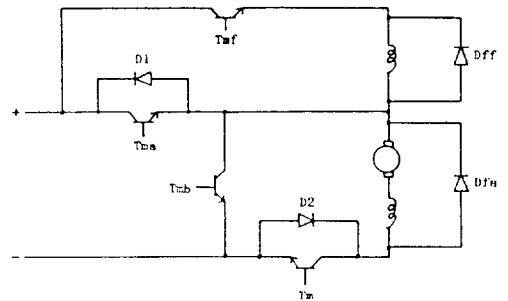


그림 5 2상한 초퍼
Fig. 5 Two quadrant chopper.

두개의 다이오드로 구성되어 있으며 그림 5의 2상한초퍼는 네개의 능동스윗칭소자와 네개의 다이오드로 구성되어 있다. 그러므로 2상한 초퍼는 능동스윗칭소자의 추가없이 단순히 두개의 다이오드를 더 사용함으로써 구성될 수 있으며 따라서 최소한의 능동스윗칭소자를 사용한 회로라고 말할 수 있다.

4. 초퍼의 동작

4.1 동작 가능한 시퀀스

모든 시퀀스는 1상한 동작에서는 모우드 A와 B로 동작하며 감속이 이루어지는 2상한 동작에서는 모우드 C와 D로 동작하고, 1-2상한 동작에서는 모우드 A, B, C, D의 동작으로 각각 이루어진다. 또한 계자회로는 용이한 제어를 위하여 한 주기에 한번 여자되며, 같은 도전회로는 한 주기에서 반복될 필요가 없다. 다음은 1상한 운전과 2상한 운전을 위해 동작 가능한 동작 시퀀스들이다.

1) 1상한 운전

시퀀스 1 : 도전회로#2 → 도전회로#3 → 도전회로#9

시퀀스 2 : 도전회로#2 → 도전회로#9 → 도전회로#3

2) 2상한 운전

시퀀스 3 : 도전회로#4 → 도전회로#10 → 도전회로#1

시퀀스 4 : 도전회로#10 → 도전회로#4 → 도전회로#1

3) 1-2상한 운전

시퀀스 5 : 도전회로#2 → 도전회로#3 → 도전회로#9

← 도전회로#1 ← 도전회로#10 ←

시퀀스 6 : 도전회로#2 → 도전회로#9 → 도전회로#3

← 도전회로#1 ← 도전회로#4 ←

시퀀스 7 : 도전회로#2 → 도전회로#9 → 도전회로#3

← 도전회로#1 ← 도전회로#10 ←

시퀀스 8 : 도전회로#2 → 도전회로#3 → 도전회로#4

← 도전회로#1 ← 도전회로#10 ←

시퀀스 9 : 도전회로#2→도전회로#9→도전회로#4
 ↳도전회로#1←도전회로#10←

시퀀스 10 : 도전회로#2→도전회로#9→도전회로#10
 ↳도전회로#1←도전회로#4←

시퀀스 11 : 도전회로#2→도전회로#9→도전회로#3
 ↳도전회로#1←도전회로#10←도전회로#4

2상한초퍼동작을 위하여는 위의 11가지 시퀀스 중에서 세가지 또는 그 이상의 시퀀스가 사용되는데 이는 스위칭 제어회로의 설계방법에 달려 있다. 초퍼시스템을 동작시키기 위하여 고려할 수 있는 점호방법은 전기자와 계자의 상대적인 펄스 위치에 따라 다음과 같이 세가지로 나눌 수 있다. (그림 6참조)

- (a) 계자펄스가 끊어짐과 동시에 전기자펄스가 시작되는 경우
- (b) 전기자펄스가 끊어짐과 동시에 계자펄스가 시작되는 경우
- (c) 두 펄스사이가 무관할 경우

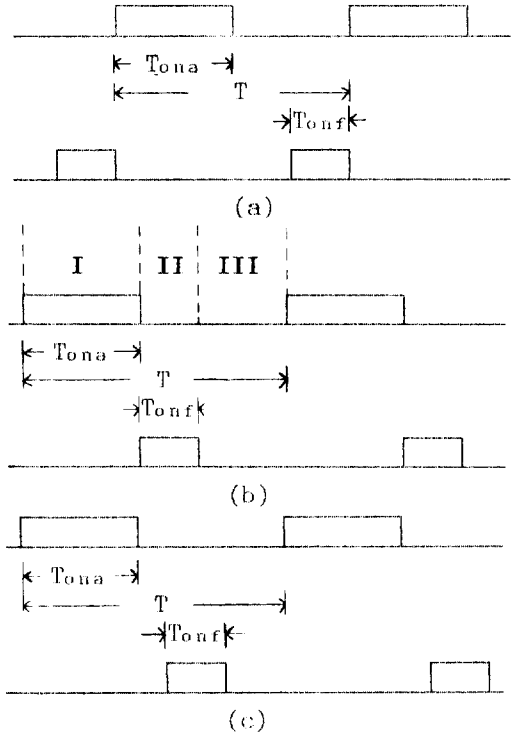


그림 6 점호방법
 Fig. 6 Firing method.

4.2 정상상태해석

여기에서는 그림 6에서 나타내고 있는 점호방법 중에서 편의상 (b)의 점호방법을 도입하였으며, 이는 그림 6(b)와 같이 세가지 모우드로 구분될 수 있다. 그림 4와 그림 5에서 T_{ma} 와 T_{mf} 의 상대적인 점호방법에 따라 T_m 과 T_{mb} 의 점호방법이 결정되어진다. 즉, 모우드 I에서 T_{ma} 와 T_m 이 턴-온되고 모우드 II에서는 T_{mf} 와 T_{mb} 가 턴-온되며 모우드 III에서는 T_{mb} 가 턴-온된다.

본 연구에서는 직권전동기도 전기자전류와 계자전류가 독립적으로 제어되므로 분권전동기와 같은 전동기 방정식을 갖는다. 따라서 인가되는 직류전원의 전압을 V 라 하면 전동기의 특성을 나타내는 방정식은 다음과 같다.

$$L_a(di_a/dt) + R_a i_a + E = A \cdot V$$

$$L_f(di_f/dt) + R_f i_f = F \cdot V$$

단, E : 역기전력

i_a : 전기자전류

i_f : 계자전류

L_a : 전기자 인덕턴스

L_f : 계자 인덕턴스

$$A = \begin{cases} 1 & \text{모우드 I의 경우} \\ 0 & \text{모우드 II과 모우드 III의 경우} \end{cases}$$

$$F = \begin{cases} 1 & \text{모우드 II의 경우} \\ 0 & \text{모우드 I과 모우드 III의 경우} \end{cases}$$

2상한 초퍼는 사용자의 의도나 직권전동기의 부하상태에 따라서 1상한과 2상한, 또는 1-2상한 운

전을 하게된다. 이때 각 능동스위칭소자에 운전상태에 따라 다른 형태의 점호 펄스를 일일이 가해주는 것은 번거로운 일이다. 따라서 각 상한에서 원하는 동작을 할 수 있으면서도 어느 경우에도 적용되는 점호방법이 필요하다. 그림7은 각 상한별 능동스위칭의 도통 구간을 만족시키는 단일화된 점호신호와 디지털컴퓨터로 시뮬레이션한 정상상태에서의 전기자전류 및 계자전류 파형이다. 물론 사용자의 의도에 따라 2상한운전을 하는 경우는 제동을 거는 상태이므로 이 경우에는 제동스위칭으로 T_{ma} 에 가해지는 펄스를 제거해주면 된다.

5. 실험결과 및 검토

제안한 2상한 초퍼를 실험하기 위하여 그림 8과 같이 전력용 트랜지스터를 이용한 전력회로를 구성하였으며 부하로는 다음의 직권전동기를 사용하였다.

- 정 격 출 력 : 1/3 Hp
- 정 격 속 도 : 1800 rpm
- 정 격 전 압 : 120 V
- 정격전기자전류 : 2 A
- 정격 계자전류 : 2 A

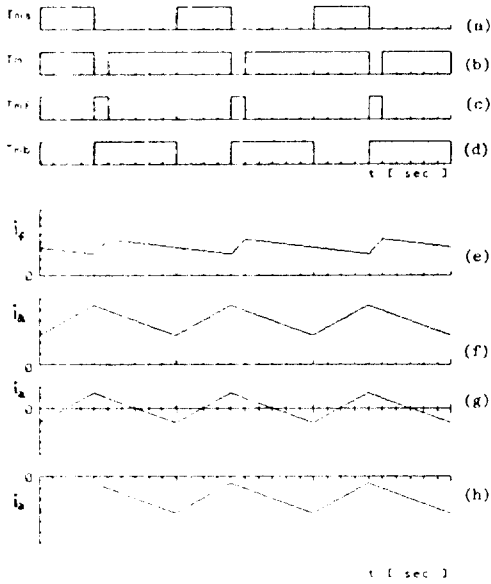


그림 7 점호신호와 시뮬레이션 결과.
 (a)-(d) 점호신호. (e) 계자전류의 파형.
 (f) 1상한 운전시의 전기자전류 파형.
 (g) 1-2상한 운전시의 전기자전류 파형.
 (h) 2상한 운전시의 전기자전류 파형.
Fig. 7 Firing signals and simulation results.
 (a)-(d) Firing signals. (e) Waveform of field current. Waveforms of armature current for (f) first quadrant operation, (g) second quadrant operation, and (h) first and second quadrant operation.

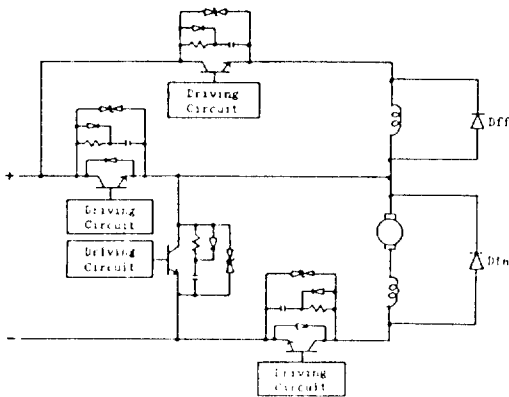


그림 8 2상한 초퍼를 사용한 직권전동기의 전력회로
Fig. 8 Power circuit of dc series motor system using two quadrant chopper.

각 트랜지스터에는 달링턴회로를 응용한 베이스 구동회로를 붙이고, 초핑주파수는 1 kHz로 하였

다. 전력회로에는 트랜지스터를 보호하기 위하여 각 트랜지스터에 스너버회로와 서어지흡수기를 부착하였으며 스터버회로의 다이오드는 역전압회복 시간이 0.5[μsec]인 고속회복다이오드를 사용하였다. 또한, 트랜지스터 T_{ma} 와 T_{mb} 가 도통되는 기간이 겹쳐서 동시에 턴-온되어 단락되는 경우를 제거하기 위하여 두 트랜지스터에 가해지는 펄스 폭에 일정한 간격을 두어 회로를 이중으로 보호하였다.

계자전류와 전기자전류를 완전히 별도로 연속 제어하기 위하여 각각의 트랜지스터의 스위칭시간을 조절하기 위한 스위칭제어회로를 다음과 같이 구

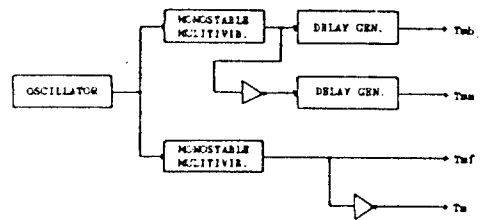


그림 9 스위칭 제어회로의 블럭선도.
Fig. 9 Block diagram of switching control circuit.

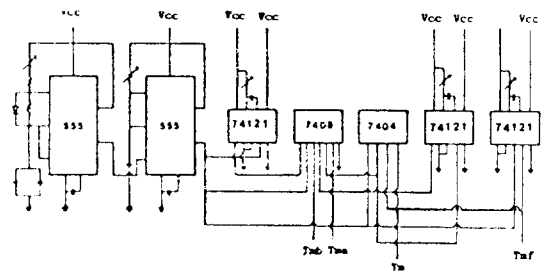


그림 10 실제의 스위칭 제어회로
Fig. 10 Actual switching control circuit.

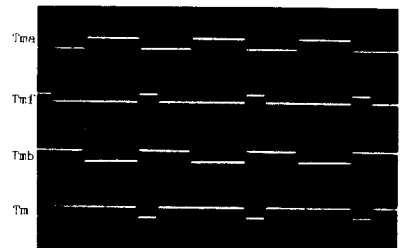


그림 11 점호신호.
Fig. 11 Firing signals.

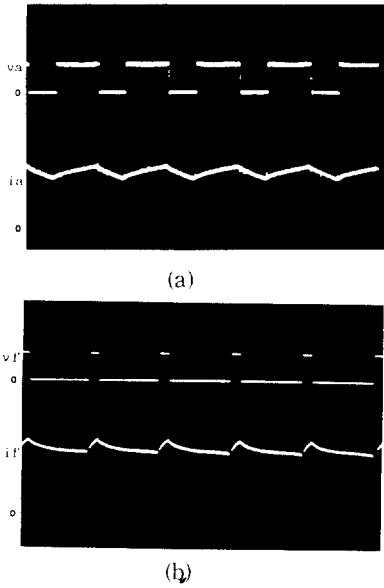


그림 12 1상한 운전시의 파형.
 (a) 전기자전압 및 전류.
 (b) 계자전압 및 전류.
Fig. 12 Waveforms in first quadrant drive.
 (a) The armature voltage and current.
 (b) The field voltage and current.

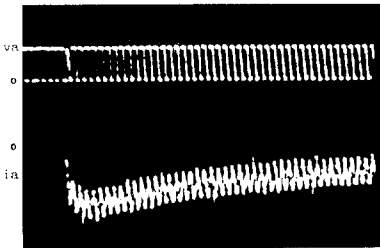


그림 13 회생모우드로 전환시의 과도상태 파형
Fig. 13 Transient waveforms from first quadrant operation to second quadrant operation.

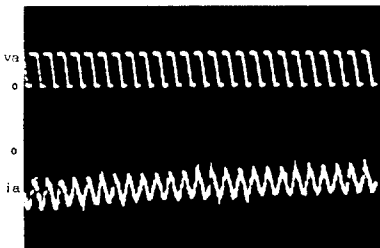


그림 14 2상한 운전시의 전기자전압 및 전류파형
Fig. 14 Waveforms of the armature voltage and current in second quadrant drive.

상하였다. 그림 9는 스위칭제어회로의 블록선도를 나타내고 있으며 그림 10은 실제의 스위칭제어회로를 나타내고있다. 제어회로에서 점호방법은 그림 6의 두번째 방법을 도입하였으며 T_{ma} 와 T_{mf} 가 각각 독립적으로 제어되고, 각각의 가변저항을 조절하여 펄스폭을 변조하도록 구성하였다. 그림 11은 각 능동스위치에 가해지는 점호신호를 나타내고 있다.

이와 같이 구성된 전역회로와 스위칭회로를 이용하여 실험을 행하여 1상한과 2상한 운전시의 전기자 및 계자의 전압, 전류파형을 구하고 1상한운전에서 2상한운전으로 전환되는 과도상태에서의 전기자전압과 전기자전류를 구하여, 본 논문에서 제안한 초퍼를 사용하면 정상운전뿐만 아니라 회생모우드의 전환이 가능함을 보였다.

그림 12는 1상한 운전시의 전기자와 계자의 전압 및 전류파형을 나타내고 있으며 그림 13은 1상한에서 정상운전을 하고 있는 초퍼에서 T_{ma} 에 가해지는 점호신호를 제거하여 2상한운전으로 전환될 때의 전기자전압 및 전류파형을 나타내고 있다.

본 연구에서는 2상한초퍼의 동작 가능성을 알아보기 위하여 오픈-우우프 방법으로 실험하였기 때문에 1상한운전에서 2상한운전으로 전환되는 과도상태의 경우는 T_{ma} 를 오픈 시키는 순간 전기자전압과 전기자전류가 급격히 회생모우드로 전환되고 있다. 그림 14는 2상한운전시의 전기자 전압과 전기자 전류의 파형을 나타내고 있는데 전기자전압은 극성을 그대로 유지하나 전기자전류는 극성이 바뀌어 회생모우드로 동작함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 직권직류전동기의 전기자전류와 계자전류를 완전히 별도로 제어할 수 있는 새로운 2상한초퍼를 제안하였다. 새로운 초퍼를 구성하기 위하여 생각할 수 있는 모든 경우를 고려한 다음에 체계적으로 타당성을 검토한 결과 구성가능한 도전회로를 얻었으며 이 중에서 선택된 도전회로들로부터 능동스위칭소자를 최소한으로 사용한 2상한초퍼를 구성하였다.

새로운 초퍼를 구성한 다음에는 전기자를 위한 능동스위칭소자가 턴-오프됨과 동시에 계자를 위한 능동스위칭소자가 턴-온되는 점호방법을 택하여 일어날 수 있는 모든 경우에 적용될 수 있는 단일화된 점호방법을 유도하였다. 또한 정상상태에서의 동작을 디지털 시뮬레이션을 행하여 해석

하였다.

마지막으로 새로 제안된 초퍼를 사용하면 직권 전동기의 전기자전류와 계자전류가 완전히 별도로 제어될 수 있으며 2상한운전이 가능함을 실험을 통하여 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 2상한초퍼를 사용하면 속도제어뿐만 아니라 효율을 향상시키는 제어알고리즘이나 회생제동의 효과적인 실현이 가능해질 것이다.

참 고 문 헌

[1] Soon Chan Hong and Min Ho Park, "Microprocessor-based optimal efficiency drive of a separately excited dc motor," IEEE TENCON proc., pp. 126-128, 1984.

[2] 이승원, 임달호, 전기기기, 보성문화사, 1980, p. 311.

[3] R.G. Hoft, Semiconductor Power Electronics, Van Nostrand Reinhold, 1986, p. 229-237.

[4] Min Ho Park and Soon Chan Hong, "Microprocessor-based high efficiency drive

of a dc series motor," IEEE IECON Proc., pp. 455-459, 1984.

[5] M. Ashiya, H. Tetsuno, M. Naruto, M. Shinobu, and K. katsuki, "Automatic variable field chopper control equipment for TEITO rapid transit authority's Yurakucho Line," Mitsubishi Electric Eng., no. 40, pp. 36-42, 1974.

[6] M. H. Rashid, "Automatic armature and field control of dc series motors," Proc. of IEE, Part B, vol. 128, no. 1, pp. 73-77, and no. 6, pp. 358-359, 1981.

[7] M.H. Rashid, "Dynamic response of automatic armature and field control of dc series motors," IEEE PESC record, pp. 1197-1208, 1983.

[8] M.H. Rashid and S.N. Bhadra, "Sequential choppers for field control of dc series motors," Proc. of International Conference on Electrical Machines, 1984.