

에너지 使用合理化를 위한
直流電動機의 速度制御

損失計算과 에너지 使用合理化 技法

金 善 慶 譯

1. 直流電動機 制御方式

損失에 대하여 고찰하기 전에 각종 制御에 대해서 간단하게 기술한다.

가. 抵抗起動, 抵抗制御

그림 1에 표시하는 바와 같이 定電壓電源(배터리, 실리콘 整流器 등)에 主回路 直列抵抗器를 거쳐 電機子를 접속하는 방식이다. 이 抵抗器가 起動 또는 速度制御用 抵抗器이고 起動用이면 抵抗値를 속도상승과 함께 줄이고 全抵抗을 短絡하였을 때 起動이 完了되고 소정의 속도가 되도록 抵抗値를 조정함으로써 속도제어도 가능하다.

가까운 예로는 電車起動用電動機가 있으나 工場動力用으로도 많이 쓰이고 있다. 그림 1은 分捲電動機를 표시하였으나 直捲, 複捲에서도 본질적으로 같다.

이 방식은 電機子主回路에 抵抗器를 접속하게 됨으로써 거기서 발생하는 손실은 매우 크다.

나. Plugging(逆相) 制動

그림 2에 표시하는 바와 같이 Plugging 제동용 抵抗器를 거쳐 電機子를 定電壓電源에 접속하는 것이다. 電動機의 逆起電力과 電源電壓이 가산되어 制御電流가 흐른다.

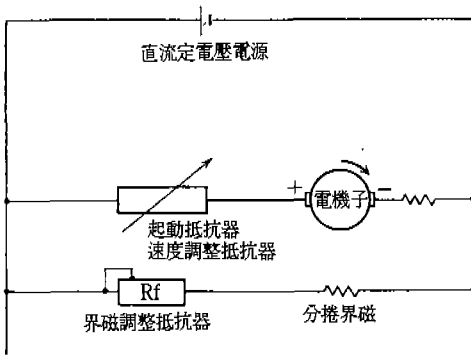
이 방식은 회전계가 갖는 관성 에너지와 制御中 電源에서 흘러 들어가는 에너지를 抵抗器에서 열의 형태로 한꺼번에 소비하게 되므로 電力消費는 크지만 속도가 제로인 상태에서도 제동 토크를 얻을 수 있다.

다. 發電制動(다이내믹 브레이크)

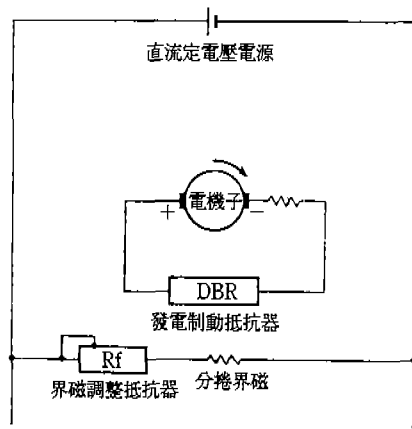
그림 3에 표시하는 바와 같이 電機子에 制動用抵抗器를 접속한다. 電動機의 속도가 떨어짐에 따라 逆起電力이 줄기 때문에 制動電流, 制動 토크도 떨어지게 되어 制動時間은 길어진다.

라. 사이리스터 레오나드方式

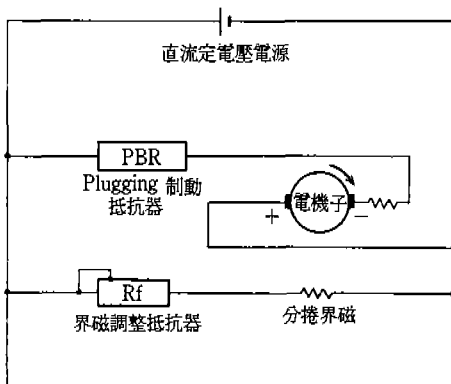
그림 4에 표시하는 바와 같이 사이리스터에 의하여 交流를 整流하여 可變電壓을 만들어 電



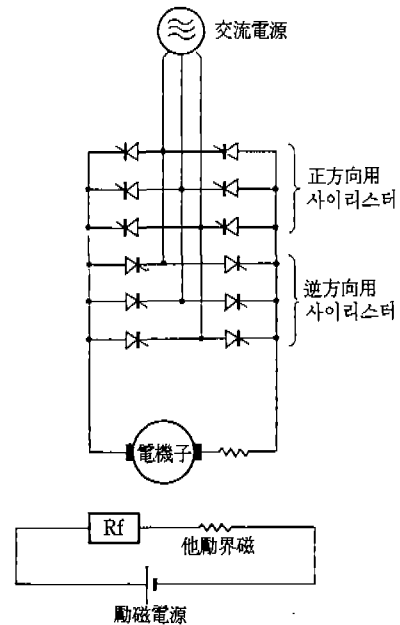
<그림 1> 抵抗起動方式, 抵抗制御方式



<그림 3> 發電制御(다이나믹 브레이크)



<그림 2> Plugging 制動



<그림 4> 사이리스터 레오나드 방식

機子에 접속한다. 사이리스터에 주어지는 點孤 펄스의 位相을 제어함으로써 直流出力의 電壓, 電流를 토크와 함께 자유로이 제어할 수가 있다. 이 방식은 主回路에 抵抗類가 없기 때문에 主回路에서의 電力損失이 없고 저속에서도 電力損이 늘어나는 일이 없다.

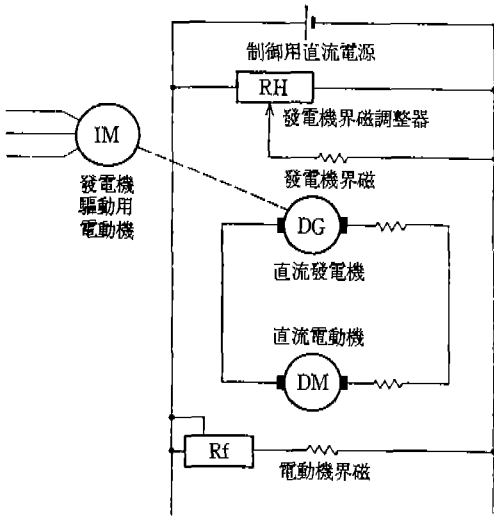
한편, 制動은 電流極性を 反轉시켜 인버터 동작으로 함으로써 이루어진다. 制動 에너지는 모두 交流側에 되돌려 보냄으로써 회수된다(再生制動). 더욱이 全速에서 低速까지 모든 범위에서 할 수 있다.

이러한 점에서 에너지 使用合理化를 하는데 있어서는 가장 훌륭한 방법이라 생각된다.

마. 워드 레오나드 방식(MG 방식)

그림 5에 표시하는 바와 같이 直流發電機의 界磁電流를 制御함으로써 可變電壓을 만들어 電機子에 공급한다.

發電機의 極性は 正逆 모두 勵磁電流의 極性



<그림 5> 워드 레오나드 방식 原理圖

을 切換하여 얻을 수 있고 制動도 電動機 逆起電力보다 조금 낮은 電壓으로 發電機電壓을 조정함으로써 回生制動으로 이루어진다. 回生制動으로 얻어진 回收 에너지는 MG를 개재시켜 交流側에 반송된다.

이 방식도 主回路에 抵抗類가 없기 때문에 電力損失이 적다. 사이리스터가 실용화되기까지 널리 사용되었다.

바. 사이리스터 Chopper

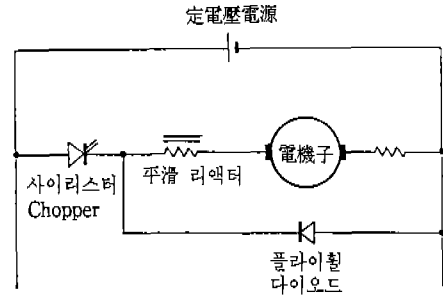
그림 6에 표시하는 바와 같이 사이리스터 스위치(Chopper)에 의하여 電機子 主回路를 고속으로 On-Off함으로써 電機子에 걸리는 電壓을(平均電壓) 制御하는 것이다.

主回路에는 抵抗이 없고 또 回生制動도 가능하므로(그림 6 (b) 참조) 에너지 절감방식이라 할 수 있다.

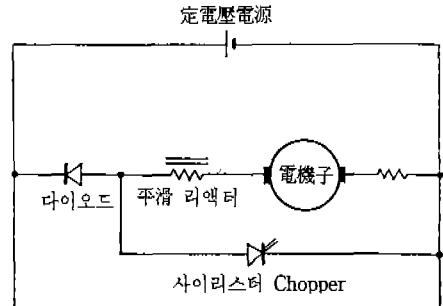
현재 실용화되고 있는 것은 지하철 등 電車用과 배터리 車用이며 앞으로 더욱더 많이 쓰여질 것으로 보인다.

2. 各種 損失에 대한 考察

直流電動機驅動系에서의 損失 에너지를 고려



(a) 電動機運轉



(b) 回生制動運轉

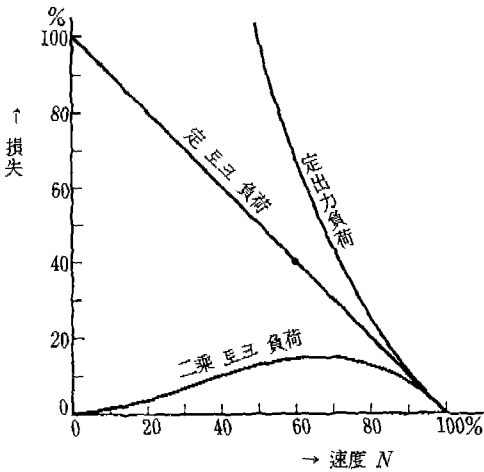
<그림 6> 사이리스터 Chopper

할 때 各種制御方式, 運轉 모드 등에 의하여 여러 가지 사항이 있다. 여기서는 그 주요한 것에 대하여 기술한다. 특별히 거론하지 않는 한 간단하게 하기 위하여 電動機自體 등에 대한 기기의 손실은 생략하기로 한다.

가. 速度制御損失

抵抗制御方式에 의하여 속도제어를 하면 속도를 줄이기 위하여 主回路에 삽입한 抵抗器에서 큰 熱損失이 생긴다. 이 損失은 低速일수록 커진다. 負荷 토크 特性이 定 토크, 2乘 토크 및 定馬力인가에 따라 발생손실의 값이 변하는데 이들을 표시한 것이 그림 7이다. 定格速度에서의 電動機出力을 100%로 하여 손실을 표시한다. 예를 들면 定 토크 負荷에서 60% 속도일 때 電動機의 出力은 60%, 손실은 40%이다.

이들의 損失特性은 捲線形誘導電動機나 渦電流 커프링과 같은 특성이다.



<그림 7> 速度制御損失

나. 起動時 損失

抵抗起動方式에 의하여 관성이 큰 負荷를 起動하면 起動중에 起動抵抗器에서 발생하는 熱은 慣性負荷에서 얻은 慣性 에너지와 같이 (1)식으로 표시된다.

$$E_s = \frac{GD^2 \cdot N^2}{730,000} \quad (1)$$

다만, E_s : 1회의 起動에서 발생하는 熱損失 (kW·s)

GD^2 : 負荷의 GD^2 (kg·m²)

N : 電動機回轉數(rpm)

慣성이 큰 負荷를 빈번하게 起動시키는 용도에서는 무시할 수 없는 값이 된다.

다. 制動 에너지

回生制動을 하면 그 制動 에너지를 회수할 수 있으므로 다른 制動方式에서는 불필요하게 熱로 버리게 되는데 비하여 에너지 使用合理化가 된다.

(1) 慣性負荷의 制動

Plugging 制動에서 慣性負荷의 制動을 하면 慣性の 에너지와 制動중 電源에서 제동하기 위하여 주어지는 에너지가 다함께 熱損失이 된다. 그 損失의 합계는 (2)식으로 표시된다.

$$E_{PB} = \frac{3 \cdot GD^2 \cdot N^2}{730,000} = \frac{GD^2 \cdot N^2}{243,333} \quad (2)$$

다만, E_{PB} : 1회의 制動에서 발생하는 熱損失 (kW·s)

GD^2 : 負荷의 GD^2 (kg·m²)

N : 制動개시할 때 電動機回轉數(rpm)

發電制動이나 電磁 브레이크 등 機械的 브레이크의 경우는 制動중 電源에서 에너지를 필요로 하지 않기 때문에 1회의 制動에서 발생하는 熱損失(kW·s)은 (3)식과 같이 표시된다. 당연한 일로서 回生制動에서 慣性負荷의 制動을 하였을 때 회수되는 에너지는 (3)식으로 표시된다.

$$E_{RB} = \frac{GD^2 \cdot N^2}{730,000} \quad (3)$$

다만, E_{RB} : 1회의 回生制動에서 회수되는 에너지(kW·s)

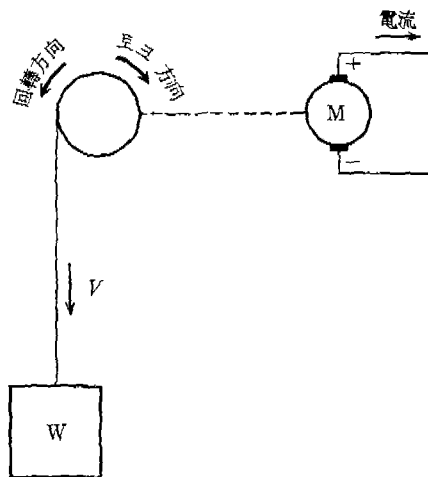
GD^2 : 負荷의 GD^2 (kg·m²)

N : 制動개시할 때 電動機回轉數(rpm)

熱損失을 발생하는 制動方式을 回生制動으로 바꾸면 발열이 줄은 분만큼 電源 에너지가 절감된다.

(2) 定速制動

예를 들면 크레인이나 엘리베이터에서 감아 내릴 때는 그림 8에 표시하는 바와 같이 電動機의 회전방향과 토크 방향이 거꾸로 된다. 일정 속도로 감아 내리도록 하기 위하여는 負荷에 따



<그림 8> 감아 내리는 荷重에 대한 制動

라 制動 토크가 필요하게 된다.

回生制動으로 이 制動을 하면 (4)식에 표시하는 만큼 電力이 회수된다.

$$P_{RB} = \frac{W \cdot V}{6120} \quad (4)$$

다만, P_{RB} : 制動電力(kW)

W : 負荷의 重量(또는 로프 張力)(kg)

V : 감아 내리는 速度(rpm)

發電制動이나 機械的 브레이크로 이 制動을 하면 (4)식과 같이 같은 에너지가 熱의 형태로 버려지게 된다.

Plugging 制動으로 이 制動을 하면 制動중 電源에서도 電力을 공급하게 되므로 制動用抵抗器에서 발생하는 熱損失은 (5)식과 같이 된다.

$$P_{PB} = \frac{2W \cdot V}{6120} = \frac{W \cdot V}{3060} \quad (5)$$

다만, P_{PB} : 熱損失電力(kW)

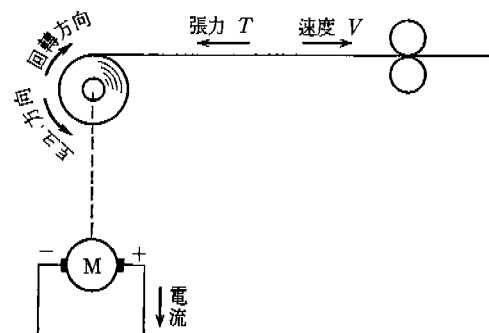
W : 負荷의 重量 또는 로프 張力(kg)

V : 감아 내리는 速度(rpm)

그림 9에 표시하는 바와 같이 철관이나 종이를 되감는 경우도 많으나 앞서 기술한 로프 張力(負荷重量)을 材料張力이라 고쳐 부를 뿐으로 같은 것이다.

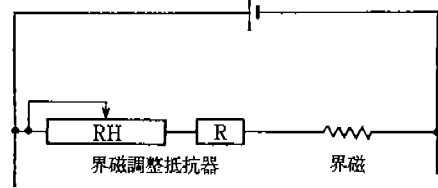
라. 界磁調整抵抗器의 損失

分捲(혹은 他勵分捲) 直流電動機의 勵磁은 일반적으로 界磁調整用抵抗器로 조정하는 방식(그림 10)과 사이리스터 勵磁器로 조정하는 방식(그림 11)이 있다.

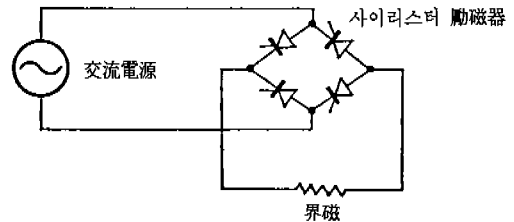


<그림 9> 되감는 기계에 대한 制動

制御用定電壓直流電源



<그림 10> 界磁調整用抵抗器



<그림 11> 사이리스터 勵磁器

式(그림 11)이 있다.

勵磁에 필요한 電力은 電動機의 사양이나 설계내용에 따라 다르기 때문에 한마디로 말할 수 없으나 界磁調整用抵抗器에서는 電動機容量의 0.5~2% 정도의 電力損失이 있다. 이를 사이리스터 勵磁로 바꾸면 그만큼 電力節減이 된다.

또 특수한 예로는 永久磁石勵磁의 直流電動機가 있어 勵磁 코일 자체가 없기 때문에 1~5% 정도의 電力節減이 되는 외에 勵磁用의 配線工事나 保護回路가 필요치 않게 되고 그만큼 경제적이다.

마. MG의 損失

워드 레오나드 방식도 사이리스터 레오나드 방식도 交流를 直流可變電壓으로 혹은 그와 거꾸로 변환시키는 것은 공통적이고 機器의 손실을 무시하였을 때 制御上의 損失이 매우 적은 것은 지금까지 기술한 바와 같다.

그러나 機器 자체의 손실을 포함하여 생각하였을 때 양자의 손실 및 그 특성에는 상당한 차이가 있다.

사이리스터 레오나드 裝置의 주요한 손실은

사이리스터 素子の 正方向電壓降下로서 正負兩極側の 素子 2개분을 합하여 3~5V 정도로 극히 적은 값이다(電動機 出力의 0.7~1.5% 정도).

워드 레오나드 方式의 경우 發電機電機子抵抗降下損, MG의 空轉損失, 發電機勵磁電力이 주된 것이다(電動機電機子抵抗은 사이리스터 레오나드, 워드 레오나드 공통이므로 여기서는 생략한다).

發電機電機子抵抗(補極, 브리쉬分도 포함)은 定格電壓의 5~10%로 사이리스터의 몇 배로 되어 있다.

MG의 空轉損失은 MG의 축수, 브리쉬 摩擦損, 風損 등으로 합계 出力의 3~6% 정도이다. 통상 MG는 主電動機가 정지중에도 그대로 돌리고 있는 경우가 많고 그 사이에도 이 空轉때문에 손실은 계속하여 발생하고 있다.

發電機의 勵磁損은 出力의 1~5% 정도로 發電機電壓發生에 따라 생긴다(發電機의 鐵損도 이때 발생하나 勵磁損에 포함시켰음).

이상의 합계가 워드 레오나드 方式의 損失이고 主電動機의 사용조건(運轉時間率, 速度 패턴, 負荷 토크율 등)에 의하여 加算하는 방식이 변하고 사이리스터 레오나드 方式과의 差가 달라진다.

예를 들면 엘리베이터와 같이 비교적 대기시간이 많으며 起動 빈도가 많고 慣性이 클 때 MG 空轉의 손실이 커서 使用電力量은 사이리스터 레오나드 方式보다 워드 레오나드 方式이 훨씬 커진다.

3. 에너지 使用合理化 檢討方向

이제까지 直流電動機의 制御와 損失에 대하여 기술하였으나 損失輕減에 관하여 검토하여야 본다.

가. 抵抗制御에서 사이리스터 레오나드 方式(또는 사이리스터 Chopper 方式)으로 변경 抵抗起動, 抵抗制御, Plugging 制動, 發電制

動 등 主回路要素에 抵抗器를 사용하는 방식(定電壓制御方式이라고 할 때도 많다)에서 사이리스터 레오나드 方式이나 사이리스터 Chopper 方式(可變電壓制御方式이라고 부를 때도 많다)으로 변경하는 案이다. 이때 速度制御損失과 起動時損失이 다함께 없어서 制動 에너지가 回生制動에 의하여 회수된다. 이들의 개선효과에 대하여는 電動機의 용도나 負荷의 종류에 따라 검토할 필요가 있다.

速度制御損失에 대하여 검토할 때 電動機의 사용속도범위, 負荷 토크 特性, 또는 각 속도에서의 負荷率, 각 속도에서의 사용시간(연간)이 필요하게 된다.

起動, 制動에 대하여는 起動 및 制動의 빈도, 電動機軸 換算의 GD^2 , 가감속시간 및 운전패턴을 알 필요가 있다. 또 (1)~(3)직은 부하 토크를 가감속 토크와 비교하여 무시해 버릴 수 있을 때이나 실제의 경우는 무시 못할 때도 있다.

나. 워드 레오나드 方式(MG)에서 사이리스터 레오나드 方式으로 변경

2. 마항에서 기술한 바와 같이 MG나 사이리스터와의 사이에도 상당한 電力損이 있어 검토해 볼 가치가 있다. 그때 電動機運轉 패턴, 運轉時間率, 負荷 토크 등이 필요하다.

더욱이 이런 경우 에너지 使用合理化 뿐만이 아니고 電氣室 바닥면적의 감소, 發電機 카본 브리쉬 保守의 불필요, 소음감소, 제어응답성의 개선 등의 메리트가 있다.

4. 計算例

가. 110 kW의 直流電動機의 抵抗制御方式에서 평균속도의 70%로 연간 4000h 사용하고 있다. 負荷 토크는 定 토크 特性이고 定格의 85%이다. 1kWh당 50원이라고 하면 損失分에 대한 금액은 얼마인가?

$$100(\text{kW}) \times 0.3 \times 0.85 \times 4000(\text{h/년}) \\ \times 50(\text{원/kWh}) = 5,610,000(\text{원/년}) \\ \text{즉 연간 } 5,610,000\text{원 이 된다.}$$

나. 110 kW, 1150rpm의 直流電動機가 있다. 負荷 및 電動機의 GD^2 는 電動機軸에서 $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 라 한다. 負荷 토크는 무시한다고 하고 기동 빈도 120회/h, 抵抗起動, Plugging 制動에서 全速까지의 加速을 반복하고 연간 6000h 가동했을 때의 抵抗損失은 얼마인가?

$$E_s = \frac{80 \times 1150^2}{730,000} = 144.9(\text{kW} \cdot \text{s})$$

$$E_{kb} = \frac{80 \times 1150^2}{730,000} \times 3 = 434.7(\text{kW} \cdot \text{s})$$

1시간당은

$$E = \frac{(144.9 + 434.7) \times 120}{3600(\text{s})} = 19.32(\text{kWh/h})$$

연간은

$$19.32 \times 6000 \times 50 = 5,796,000(\text{원/년})$$

연간 5,796,000원이 된다.

다. 나항에서 계산한 110 kW 直流電動機를 워드 레오나드 방식과 사이리스터 레오나드 방식으로 변경한다고 하면 兩方式의 電力差는 얼마인가?

加速 및 減速은 100% 電流라 하고 負荷 토크는 무시한다. 1회의 운전시간은 10초로 한다.

發電機는 130 kW, 電機子 I^2R 은 12 kW, 勵磁容量은 3 kW(勵磁電流와 發電機電壓은 거의 비례한다고 본다), MG 空轉損失은 5 kW로 보고 사이리스터 레오나드 主回路損失은 1.5 kW로 한다.

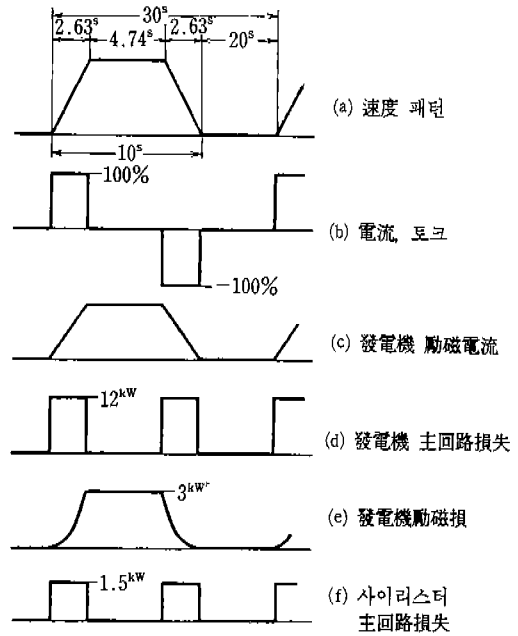
1시간에 120회이므로 1사이클은 30초에 1회, 10초간 운전하게 된다. 起動 및 減速時間을 t_a , t_d 로 하고 電動機 100% 토크를 T_M 라 하면

$$T_M = \frac{110(\text{kW}) \times 974}{1150(\text{rpm})} = 93.17(\text{kg} \cdot \text{m})$$

$$t_a = t_d = \frac{80(\text{kg} \cdot \text{m}^2) \times 1150(\text{rpm})}{375 \times 93.17(\text{kg} \cdot \text{m})} = 2.63(\text{s})$$

速度 패턴은 그림 12 (a)에 표시하는 바와 같으며 電機子電流 또는 토크는 그림 12 (b)가 된다. 이에 대응하는 發電機勵磁電流는 그림 12 (c), 發電機主回路損失은 그림 12 (d), 發電機勵磁損失은 그림 12 (e)가 된다. 한편 사이리스터 레오나드의 경우 主回路損失은 그림 12 (f)가 된다.

1회의 運轉에 대한 發電機主回路損失 E_{GL_1} 은



<그림 12> 計算例에 대한 各種波形

$$E_{GL_1} = 12(\text{kW}) \times 2.63(\text{s}) \times 2 = 63.12(\text{kW} \cdot \text{s})$$

發電機勵磁損失 E_{GL_2} 는

$$E_{GL_2} = 3(\text{kW}) \times (10(\text{s}) - 2.63 \times 2) + (2.63 \times 2) = 19.48(\text{kW} \cdot \text{s})$$

MG의 空轉損失 E_{GL_3} 는

$$E_{GL_3} = 5(\text{kW}) \times 30(\text{s}) = 150(\text{kW} \cdot \text{s})$$

합치는 $E_{GL_1} + E_{GL_2} + E_{GL_3}$

$$= 63.12 + 19.48 + 150 = 232.6(\text{kW} \cdot \text{s})$$

한편 1회의 운전에 대한 사이리스터 레오나드의 主回路損失 E_{TL} 은

$$E_{TL} = 1.5(\text{kW}) \times 2.63(\text{s}) \times 2 = 7.89(\text{kW} \cdot \text{s})$$

이 兩損失의 比는 $232.6/7.89 = 29.48(\text{倍})$ 로 큰 값이 된다. 兩方式의 損失의 差는

$$232.6 - 7.89 = 224.71(\text{kW} \cdot \text{s})$$

연간에는

$$\frac{224.71(\text{kW} \cdot \text{s}) \times 6000(\text{h})}{30(\text{s})} = 44942(\text{kW} \cdot \text{h})$$

年間電力料金は $44,942 \times 50 = 2,247,100(\text{원})$

약 225만원의 差가 생긴다.

☞ 다음 호에 계속