

직류전동기의 속도제어방식과 손실계산법

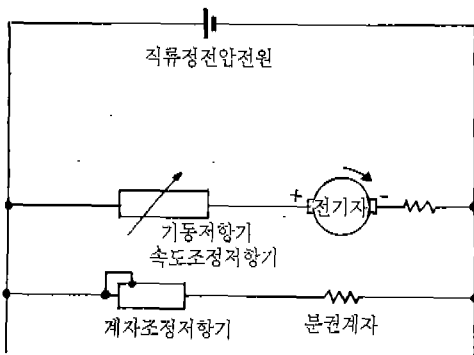
역/대한전기기사협회

1. 직류전동기 제어방식

직류전동기의 여러가지 속도제어방식의 기본에 대하여 간략하게 기술하면 다음과 같다.

(1) 저항기동, 저항제어

<그림 1>과 같이 정전압전원(배터리, 실리콘 정류기 등)에 주회로 직렬저항기를 거쳐 전기자를 접속하는 저항기로서 기동용어라던 저항치를 속도상승과 함께 줄어가고 전저항이 단락하였을 때에 기동이 끝나도록 하며 소정의 속도가 되도록 저항치를 조정함으로써 속도제어도 가능하다.



<그림 1> 저항기동방식 저항제어방식

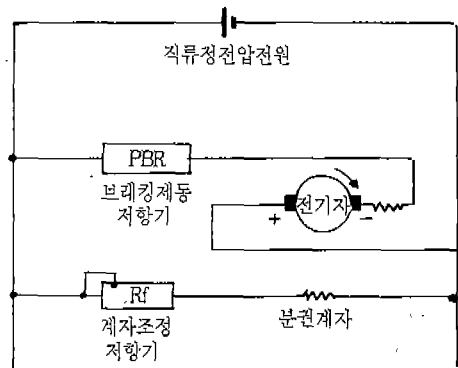
일례로서는 전차구동용 전동기가 있다. 공장의 동력용으로서도 상당히 많이 쓰여지고 있다. <그림 1>에 분권전동기를 표시하였으나 직권, 복권전동기에서도 본질적으로는 같다.

이 방식은 전기자 주회로에 저항기를 접속하기 때문에 거기서 발생하는 손실은 매우 크다.

(2) 브레이크(역상)제동

<그림 2>와 같이 브레이크제동용 저항기를 거쳐 전기자를 정전압전원에 접속하는 것이다. 전동기의 역기전력과 전원전압이 가산되어 제동전류가 흐른다.

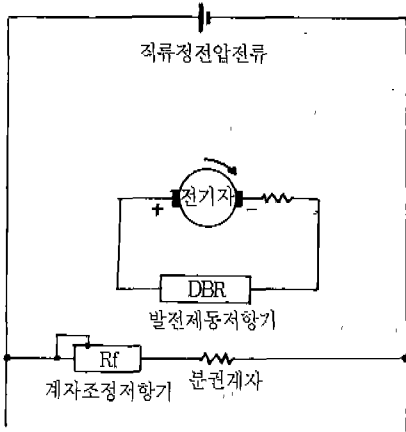
이 방식은 회전계가 가지고 있는 관성의 에너지가 제동중 전원에서 흘러 들어가는 전류에 의한 에너지를 함께 저항기로 열의 형태로 소비하기 때문에 전력소비는 많으나 속도가 0이라도 제동토크를 얻을 수 있다.



<그림 2> 브레이크 제동

(3) 발전제동(다이내믹 브레이크)

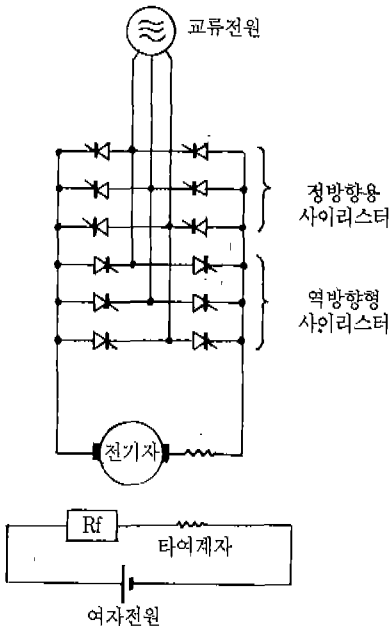
<그림 3>에 표시하는 바와같이 전기자에 제동용 저항기를 접속한다. 전동기 속도가 떨어짐에 따라 열기전력이 줄어들기 때문에 제동전류, 제동토크도 줄어든다. 따라서 제동시간은 길어진다.



<그림 3> 발전제어(다이내믹 브레이크)

(4) 사이리스터 레오나드방식

<그림 4>에 표시하는 바와같이 사이리스터에 의하여 교류를 정류하고 가변전압을 만들어 전기차에 접속한다. 사이리스터에 주어지는 점교펄스의 위상을 제어함으로써 직류출력의 전압, 전류를 정역 마음대



<그림 4> 사이리스터 레오나드방식

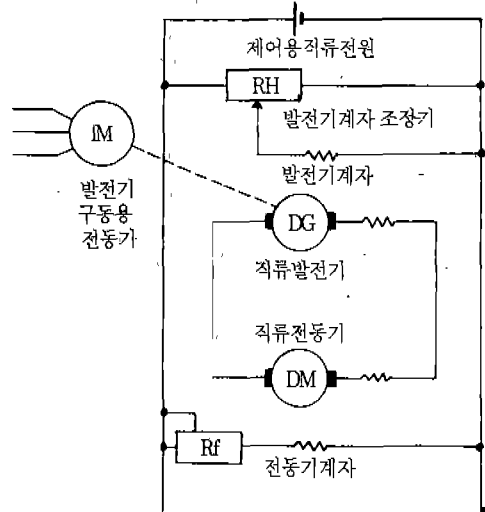
로 값을 제어할 수 있다. 따라서 속도, 토크 모두 자유롭게 제어가 된다. 이 방식은 주회로에 저항류가 없기 때문에 주회로에서의 전력손실이 없고 저속에서도 전력손실이 늘어나는 법이 없다.

한편, 제동은 전류극성을 반전시켜 인버터동작을 시킴으로써 제동에너지를 모두 교류측에 돌려보냄으로써 회수된다(自生制動). 더구나 고속도에서 저속도까지 모든 범위에 걸쳐 될 수 있다.

이러한 점에서 에너지를 절감하는데 있어서 가장 훌륭한 방법이다.

(5) 워드 레오나드방식(MG방식)

<그림 5>에 묘사한 바와같이 직류발전기의 계자 전류를 제어함으로써 가변전압을 만들어 전기차에 공급한다.



<그림 5> 워드 레오나드방식 원리도

발전기의 극성은 정, 역 어느 것이라도 여자전류의 극성을 절환하여 얻을 수 있고 제동도 전동기 역기 전력으로 아주 얇은 전압으로 발전기전압을 조정함으로써 회생제동식으로 행하여진다. 회생제동으로 얻어진 회수에너지는 MG를 개재시켜 교류측에 반송된다.

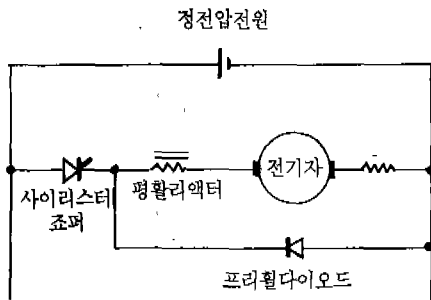
이 방식도 주회로에 저항류가 없기 때문에 전력손실이 적다. 사이리스터가 실용화 되기까지 널리 쓰여진 것이다.

(6) 사이리스터 쏘퍼

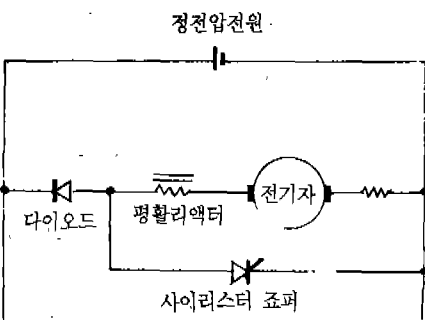
<그림 6>에 표시하는 바와같이 사이리스터 스위치(쏘퍼)에 의하여 전기자 주회로를 고속으로 on-off시킴으로써 전기자에 걸리는 전압을(평균전압) 제어하는 것이다.

주회로에는 저항이 없고 또 회생제동도 가능한 것으로(<그림 6> (b)) 에너지 절감방식이다.

현재 실용화 되고 있는 것은 지하철 등의 전차용과 배터리차용이고 앞으로 더욱 더 널리 쓰여질 것으로 생각된다.



(a) 전동기운전



(b) 회생제동운전

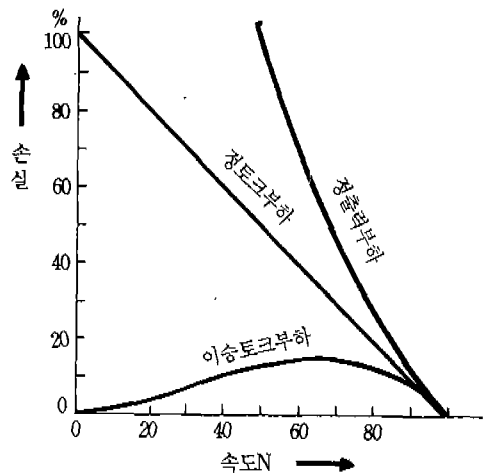
<그림 6> 사이리스터 쏘퍼

2. 각종 손실에 대하여

직류전동기 구동계에서의 손실에너지를 고려할 적에 각종 제어방식, 운전모드 등에 따라 여러가지의 사항이 있다. 여기서는 그 주요한 것에 대하여 기술한다. 특별하게 기술하지 않는 한 간단히 하기 위하여 전동기 자체 등 기기의 손실은 줄이고 진행시키기를 한다.

(1) 속도제어손실

저항제어방식에 의하여 속도제어를 하면 속도를 떨어뜨리기 때문에 주회로에 삽입된 저항기에서 큰 열손실이 생긴다. 이 손실은 저속일수록 커진다. 부하토크 특성이 정토크, 이송토크와 정하여진 마력인가에 따라 발생손실의 값이 변한다. 그것들을 표시한 것이 <그림 7>이다. 정격속도에서의 전동기 출력을 100%로 하여 손실을 표시한다. 예를들면 정토크 부하에서 60% 속도시 전동기의 출력은 60%, 손실은 40%이다.



<그림 7> 속도제어손실

이들의 손실특성은 권선형 유도전동기나 와전류접속기구와 같은 특성이다.

(2) 기동시 손실

저항기동방식에 의하여 관성이 큰 부하를 기동하면 기동중에 기동저항기에서 발생하는 열은 관성부하로 인하여 얻어진 관성의 에너지와 같은 (1)식으로 표시된다.

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

단, E_s : 1회의 기동으로 발생하는 열손실[kw·s]
 GD^2 : 부하의 GD^2 [kg·m²]
 N : 전동기 회전수[rpm]

관성이 큰 부하를, 빈번하게 기동을 하는 용도에서는 무시할 수 없는 값이 된다.

(3) 제동에너지

회생제동을 하면 그 제동에너지를 회수할 수 없기 때문에 다른 제동방식에서는 불필요하게 열로서 버리게 되는데 비하여 에너지 절감이 된다.

(a) 관성부하의 제동

브레이크제동에서는 관성부하의 제동을 하면 관성에너지와 제동중 전원에서의 제동 때문에 주어지는 에너지가 열손실이 된다. 그 손실의 합계는 (2)식으로 표시된다.

$$E_p = \frac{3 \cdot GD^2 \cdot N^2}{730,000} = \frac{GD^2 \cdot N^2}{243,333} \dots\dots\dots(2)$$

단, E_p : 1회의 제동으로 발생하는 열손실[kW·s]
 GD^2 : 부하의 GD^2 [kg·m²]
 N : 제동개시시의 전동기회전수[rpm]

발전제동이나 전자브레이크 등 기계적 브레이크의 경우는 제동중 전원에서 에너지를 필요로 하지 않기 때문에 1회의 제동으로 발생하는 열손실[kw·s]는 (3)식과 같이 표시된다.

당연한 일로서 회생제동에서 관성부하의 제동을 하였을 때 회수되는 에너지는 (3)식과 같다.

$$E_p = \frac{GD^2 \cdot N^2}{730,000} \dots\dots\dots(3)$$

단, E_p : 1회의 회생제동에서 회수되는 에너지[kW·s]

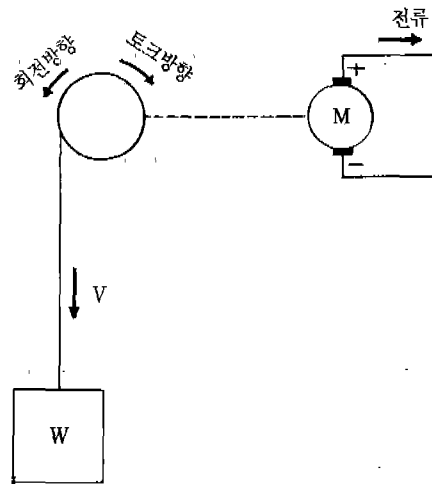
GD^2 : 부하의 GD^2 [kg·m²]

N : 제동개시시의 전동기회전수[rpm]

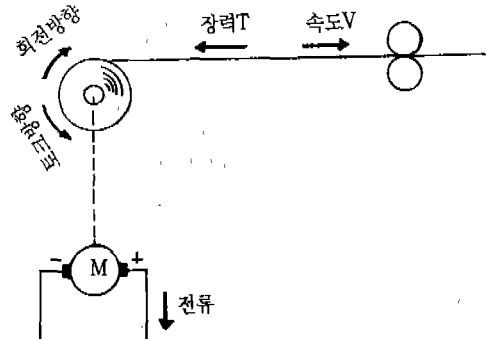
열손실을 발생하는 제동방식을 회생제동으로 전환하면 발열이 줄어드는 것만큼 전원에너지가 절감된다.

(b) 정속제동

예를들면 크레인이나 엘리베이터 등에서 감아 내릴 때는 <그림 8>에 표시하는 바와같이 전동기의 회전방향과 토크의 방향이 반대로 된다. 일정속도로 감아 내려가기 위하여는 하중에 따른 제동토크가 필요하다.



<그림 8> 감아내리는 하중에 대한 제동



<그림 9> 되감는 기계에 대한 제동

회생제동에서 이 제동을 하면 (4)식에 표시한 만큼의 전력이 회수된다.

$$P_{RS} = \frac{W \cdot V}{6,120} \dots\dots\dots(4)$$

단, P_{RS} : 제동전력[kW]

W: 하중의 중량(또는 로프장력) [kg]

V: 감아 내리는 속도[rpm]

발전제동이나 기계적 브레이크로 이 제동을 하면 (4)식과 같이 에너지가 열의 형태로 버려진다.

브레이크제동으로 이 제동을 하면 제동중 전원에서도 전력을 공급하게 된다.

이 때 제동용 저항기에 발생하는 열손실은 (5)식과 같다.

$$P_R = \frac{2W \cdot V}{6,120} = \frac{W \cdot V}{3,060} \dots\dots\dots(5)$$

단, P_R : 열손실전력[kW]

W: 하중의 중량 또는 로프장력[kg]

V: 감아 내리는 속도[rpm]

<그림 9>에 표시하는 바와같이 철판이나 종이를 되감는 것도 많으나 앞서 기술한 로프장력(하중중

량)을 재료장력으로 부를 뿐 같은 의미이다.

(4) 자계조정저항기의 손실

분권(혹은 타여분권) 직류전동기의 여자는 일반적으로 계자조정용저항기로 조정하는 방식 <그림 10>과 사이리스터 여자기로 조정하는 방식 <그림 11>이 있다.

여자에 필요한 전력은 전동기의 사양이나 설계내용에 따라 다르기 때문에 한마디로 말할 수는 없으나 계자조정용 저항기에서는 전동기용량의 0.5~2.0% 정도의 전력손실이 있다. 이것을 사이리스터 여자로 바꾸면 그 분량만큼 전력절감이 된다. 또 특수한 예로서는 영구자석의 직류전동기가 있어 여자코일 자체가 없으므로 1~5% 정도의 전력절감이 되는 외에 여자용의 배선공사나 보호회로가 필요치 않기 때문에 그만큼 경제적이다.

(5) MG의 손실

워드 레오나드방식도 사이리스터 레오나드 방식도 교류를 직류 가변전압으로 혹은 그 반대의 변환을 하는 것은 공통되며 기기의 손실을 무시하였을 때 제어상의 손실을 적은 것은 현재까지 기술한 바와 같다.

그러나 기기자체의 손실도 포함하여 생각하였을 때 양자의 손실 및 그 특성에는 상당한 차이가 있다.

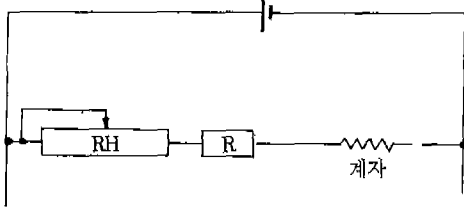
사이리스터 레오나드장치의 중요한 손실은 사이리스터 소자의 정방향 전압강하로 정부 양극측의 소자 2개분을 합한 3~5V정도로 극히 적은 값이다(전동기 출력의 0.7~1.5% 정도).

워드 레오나드방식의 경우 발전기전기자 저항강하 손, MG의 공전손실, 발전기여자전력이 주된 것이다.

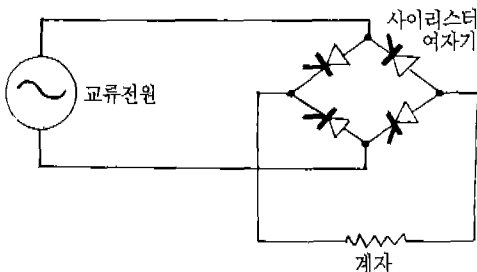
발전기전기자 저항은 정격전압의 5~10%로 사이리스터의 몇배로 되어 있다.

MG의 공전손실은 MG의 축반이, 브러시 마찰손, 풍손 등으로 합쳐는 출력의 3~6%정도이다. 통상적으로 MG는 주전동기가 정지중에도 그대로 돌릴 때

제어용정전압직류전원



<그림 10> 계자 조정용 저항기



<그림 11> 사이리스터 여자기

가 많고 그 사이에도 공전때문에 발생하는 손실은 계속하여 발생한다.

발전기의 여자손은 출력의 1~5% 정도이며 발전기 전압발생에 따라 생긴다 (발전기의 손실로 이때 발생하나 여자손에 포함시켰다).

이상의 합계가 워드 레오나드방식의 손실이고 주전동기의 사용조건(운전시간을, 속도패턴, 부하토크 등)에 의하여 가산방식이 변하고 사이리스터 레오나드방식과의 차가 다르게 된다.

예를들면 엘리베이터와 같이 비교적 대기시간이 많고 기동빈도가 많으며 관성이 클때 MG공전의 손실이 커져서 사용전력량은 사이리스터 레오나드방식보다 워드 레오나드방식이 훨씬 커진다.

3. 에너지절감을 위한 검토

이제까지 직류전동기의 제어와 손실에 대하여 기술하였으나 손실경감에 대하여 검토할 방향을 생각해 보기로 한다.

(1) 저항제어에서 사이리스터 레오나드방식(또는 사이리스터 쇼퍼방식)으로의 변경

저항기동, 저항제어 프래킹제동, 발전제동 등 주회로 요소에 저항기를 사용하는 방식(정전압제어방식이라 부를 때도 있다)에서 사이리스터 레오나드방식이나 사이리스터 쇼퍼방식(가변전압 제어방식이라 부를 때도 있다)으로 변경하는 방안이다. 이때 속도 제어손실과 기동시 손실이 다같이 없어지고 제동에너지가 회생제동에 의하여 회수된다. 이들의 개선효과는 전동기의 용도나 부하의 종류에 따라 검토할 필요가 있다.

속도제어손실에 대하여 검토할 때 전동기의 사용 속도범위, 부하 토크특성, 또는 각 속도에서의 부하율, 각 속도에서의 사용시간(연간)이 필요하게 된다.

기동, 제동에 대하여는 기동, 제동의 빈도, 전동기축 환산의 GD², 가감속시간 및 운전패턴을 알 필요가 있다.

또 (1)~(3)식은 부하토크를 가속토크에 비교하여 무시될 수 있는 경우이나 실제의 경우는 무시 못할 때도 있다.

(2) 워드 레오나드방식(MG)에서 사이리스터 레오나드방식으로 변경

2의 (5)항에 기술한 바와 같이 MG와 사이리스터와의 사이에도 상당한 전력손의 차이가 있어 검토할 가치가 있다. 그때 전동기 운전패턴, 운전시간을 부하토크 등이 필요하다.

또 이때 에너지절감뿐 아니라 전기실 바닥면적의 감소, 발전기 카본브러시의 보수 불필요, 소음감소, 제어응답성의 개선 등의 메리트도 있다.

4. 계산 예

(1) 110kW의 직류전동기의 저항제어방식으로 평균속도 70%에서 연간 4,000시간을 사용하고 있다. 부하토크는 정토크특성에서 정격의 85%이다. 1kWh당 전기요금 60원으로 보면 손실분에 대한 금액은 얼마인가.

$$110\text{kW} \times 0.3 \times 0.85 \times 4,000[\text{h}/\text{년}] \times 60[\text{원}/\text{kWh}] = 6,732,000[\text{원}/\text{년}]$$

즉, 연간 6,732,000원이 된다.

(2) 110kW, 1,150rpm의 직류전동기가 있어 부하 및 전동기의 GD²는 전동기축에서 80kg·m²이라 한다. 부하토크는 무시할 수 있다고 하고 기동빈도 120회/h, 저항기동, 프래킹제동에서 전속도까지의 가속을 반복하여 연간 6,000시간 가동하였을 때의 저항손실은 얼마인가.

$$E_s = \frac{80 \times 1,150^2}{730,000} = 144.9[\text{kW} \cdot \text{s}]$$

$$E_{rs} = \frac{80 \times 1,150^2}{730,000} \times 3 = 434.7[\text{kW} \cdot \text{s}]$$

한 시간당은

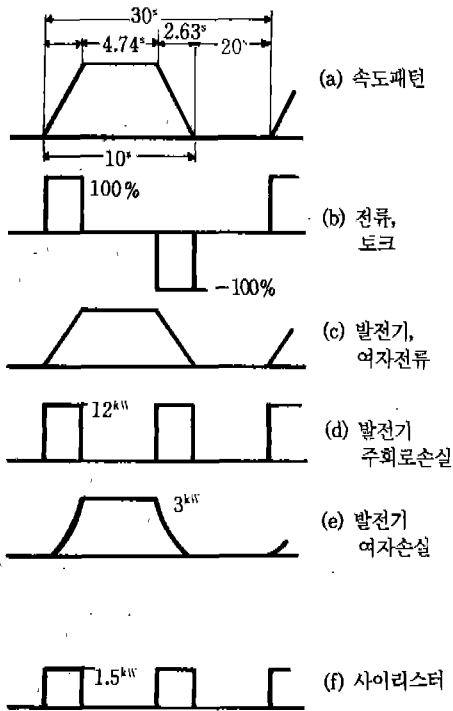
$$E = \frac{(144.9 + 434.7) \times 120}{3,600[\text{s}]} = 19.32[\text{kWh}/\text{h}]$$

연간은

$$19.32 \times 6,000 \times 60 = 6,955,200 [\text{원/년}]$$

즉, 연간 6,955,200원이 된다.

(3) (2)에 계산한 110kW직류전동기를 워드 레오나드 방식과 사이리스터방식으로 변경한다고 하여 두



<그림 12> 계산 예에 대한 각종 파형

방식의 전력차는 어떻게 되나.

가속 및 감속은 100%전류로 하고 부하토크는 무시한다. 1회의 운전시간은 10초로 한다.

발전기는 130kW, 전기자 PR_a는 12kW, 여자용량은 3kW(여자전류와 발전기전압은 거의 비례하는 것으로 한다), MG공전손실은 5kW로 하고 사이리스터 레오나드 주회로손실은 1.5kW로 한다.

1시간에 120회이니까 1사이클은 30초에 1회, 10초간 운전하는 것이 된다. 기동 및 감속시간을 t_a, t_d라 하고 전동기 100%토크를 T_M이라 하면

$$T_M = \frac{110 [\text{kW}] \times 974}{1,150 [\text{rpm}]}$$

$$= 93.17 [\text{kg} \cdot \text{m}]$$

$$t_a = t_d = \frac{80 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \times 1,150 [\text{rpm}]}{375 \times 93.17 [\text{kg} \cdot \text{m}]}$$

$$= 2.63 [\text{s}]$$

속도패턴은 <그림 12(a)>에 표시하는 바와 같고 전기자전류 또는 토크는 <그림 12(b)>가 된다. 이에 대한 발전기여자전류는 <그림 12(c)>, 발전기 주회로 손실은 <그림 12(d)>, 발전기여자손실은 <그림 12(e)>와 같이 된다. 한편, 사이리스터 레오나드의 경우 주회로 손실은 <그림 12(f)>와 같다.

1회의 운전에 대한 발전기 주회로 손실은 E_{G1}은

$$E_{G1} = 12 [\text{kW}] \times 2.63 [\text{s}] \times 2 = 63.12 [\text{kW} \cdot \text{s}]$$

발전기여자손실 E_{G2}는

$$E_{G2} = 3 [\text{kW}] \times (10 [\text{s}] - 2.63 \times 2) + (2.63 + 2) = 18.85 [\text{kW} \cdot \text{s}]$$

MG공전손실 E_{G3}은

$$E_{G3} = 5 [\text{kW}] \times 30 [\text{s}] = 150 [\text{kW} \cdot \text{s}]$$

합계

$$E_{G1} + E_{G2} + E_{G3} = 63.12 + 18.85 + 150 = 231.97 [\text{kW} \cdot \text{s}]$$

한편, 1회의 운전에 대한 사이리스터 레오나드의 주회로 손실 E_{TL}은

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

이 양쪽 손실의 비는 231.97/7.89=29.40[배]로 큰 값이 된다.

두 방식의 손실차는

$$231.97 - 7.89 = 224.08 [\text{kW} \cdot \text{s}]$$

연간에는

$$\frac{224.08 [\text{kW} \cdot \text{s}] \times 6,000 [\text{h}]}{30 [\text{s}]} = 44,816 [\text{kWh}]$$

연간 전력요금으로는

$$44,816 \times 60 = 2,688,960 [\text{원}]$$

약 270만원의 차이가 생긴다.

죄송합니다.

이번호는 기사가 넘치는 관계로 인생나수는 쉽니다.