

에너지 節減에 사용되는 各種 電動機

渦電流 커플링의 效果的인 使用方法

金 善 慶 譯

1. 渦電流 커플링의 原理

渦電流 커플링은 유명한 '아라고의 圓盤 (Arago's Disc)'의 原理를 응용한 回轉電氣機械의 하나이다. 그림 1과 같이 導電性의 圓盤을 軸을 중심으로 회전시켜 놓고 여기에 磁石을 가까이 하면 磁石도 圓盤도 같은 방향으로 회전한다. 이것은 圓盤이 회전하여 磁石의 磁力線을 끊으면 圓盤內에 그림 1과 같은 渦電流가 발생하고, 이 渦電流와 磁力線 세기의 곱에 비례하는 電磁力이 발생하여 이 반작용으로서 磁石으로 하여금 圓盤을 같은 방향의 회전력이 발생토록 하는 것이다.

渦電流 커플링은 그림 2, 3, 4와 같이 圓盤의 역할을 하는 드럼을 籠形誘導電動機에 연결하여 일정속도로 회전시켜서 磁石의 역할을 하는 誘導子(磁極)를 出力軸에 연결하여 勵磁코일에 勵磁電流를 흘리면 아라고의 圓盤의 원리에 의하여 토크를 出力軸에 전달할 수가 있다.

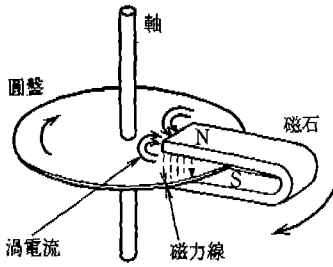
이때의 토크-速度特性은 그림 5와 같이 되

어 勵磁電流가 크면 클수록 큰 토크를 얻을 수가 있다.

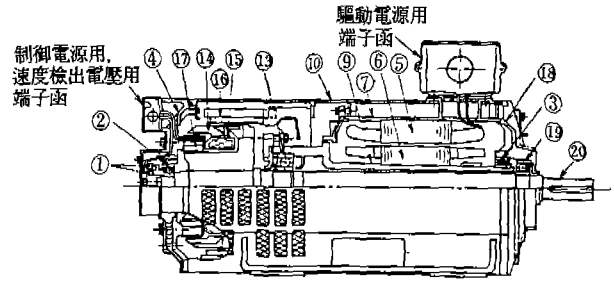
負荷토크 특성이 그림 5와 같을 때는 勵磁電流 100%에서는 N_1 (rpm)에서 균형이 맞아 그들의 회전으로 각기 일정속도로 돌게 된다.

이와 같이 渦電流 커플링은 勵磁電流를 바꾸어 속도를 자유롭게 조정할 수가 있다. 다만, 이대로는 負荷가 변동하면 속도도 변동하므로 그림 6과 같은 速度檢出發電機를 설치하여, 자기가 지금 몇 회전으로 돌고 있는가를 피드백하여 설정치와 맞추어 보아 그 편차가 負荷에 맞는 토크를 발생시키는 勵磁電流를 흘리는데 충분한 값이(일반적으로 미소함) 되도록 자동제어를 하여 負荷가 변동하여도 설정속도 부근에서는 거의 一定值를 유지하면서 그림 7과 같이 운전되도록 한다. 이때 필요한 制御電力은 1000 kW 급에서 8 kW 정도이고, 동력의 약 1% 정도로 그치는 것이 다른 可變速機와 다른 큰 특징이다.

이상과 같이 渦電流 커플링은 誘導電動機에

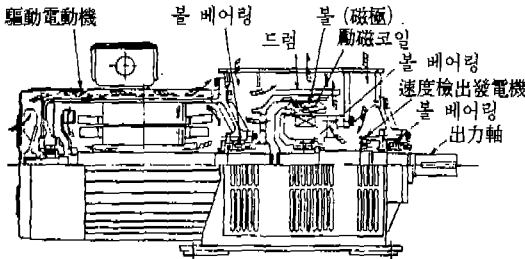


<그림 1> 아라고의 圓盤

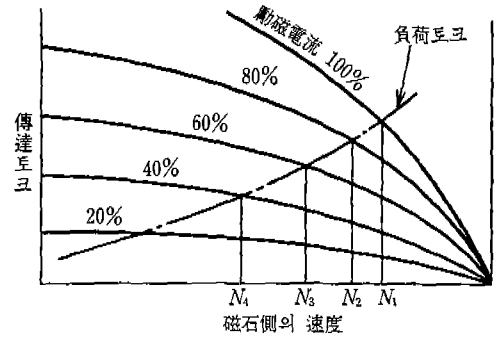


- ① 速度檢出發電機
- ② 連結反對側 축만어
- ③ 中空軸 축만어
- ④ 브래킷 (連結反對側)
- ⑤ 電動機部固定子
- ⑥ 電動機部回轉子
- ⑦ 中間 프레임
- ⑧ 端子函
- ⑨ 中空軸
- ⑩ 프레임
- ⑪ 아이볼드
- ⑫ 프링거
- ⑬ 中間 축만어
- ⑭ 드럼
- ⑮ 勵磁코일
- ⑯ 誘導子
- ⑰ 요크
- ⑱ 브래킷 (連結側)
- ⑳ 連結側 축만어
- ㉑ 出力軸

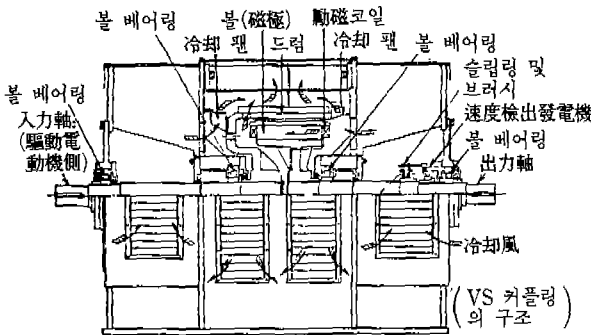
<그림 2> 37 kW 4p 以下の 渦電流 커플링 설치 모터



<그림 3> 45 kW 4p~250 kW 4p



<그림 5> 速度토크 基本特性



<그림 4> 315 kW 4p~2000 kW 8p

설치하여 交流에서 간단하게 可變速이 되는 손쉬운 可變速機이다.

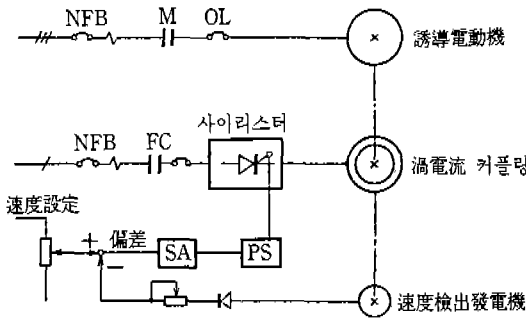
2. 渦電流 커플링의 入力 및 出力

渦電流 커플링은 勵磁電流를 변동시키면서 드럼안에 발생하는 渦電流 I_e 를 변화시켜 토크

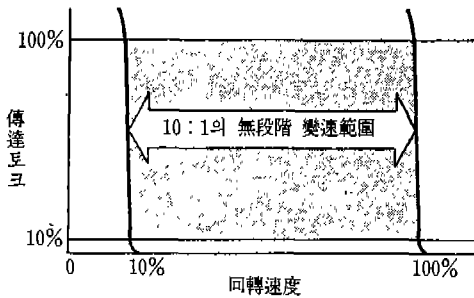
를 조정하는 회전기라는 것을 기술하였다. 이것은 또 한편에서 보면 誘導電動機의 동력이 渦電流에 의하여 드럼안에 줄(Joule) 손실로서 소비되는 것으로 인하여 그 差分의 동력을 出力軸에 전달함과 동시에 그 손실에 알맞는 슬립(Slip) 회전수가 발생하여 出力軸 회전이 변화하는 것이라 말할 수 있다. 이들의 관계를 그림 8에 표시한다.

여기서

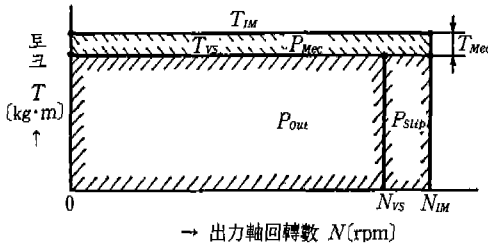
$$P_{IM} : \text{誘導電動機 出力 [kW]}$$



<그림 6>



<그림 7> 속도-토크 垂下特性(自動速度制御特性)



<그림 8> 渦電流 커플링의 入力, 出力

- P_{Slip} : 渦電流 커플링의 슬립 損失(渦電流에 의한 損) (kW)
- P_{Out} : 渦電流 커플링의 出力 (kW)
- P_{Mec} : 渦電流 커플링의 機械損 (kW)
- T_{IM} : 誘導電動機의 出力토크 (kg·m)
- T_{Vs} : 渦電流 커플링의 出力토크 (kg·m)

T_{Mec} : 渦電流 커플링의 機械損토크 (kg·m)

N_{IM} : 誘導電動機의 出力回轉數 (rpm)

N_{Vs} : 渦電流 커플링의 出力回轉數 (rpm)

이라 하면

$$P_{IM} = P_{Out} + P_{Slip} + P_{Mec} \text{ (kW)} \quad (1)$$

$$P_{Out} = T_{Vs} \times N_{Vs} / 973 \text{ (kW)} \quad (2)$$

$$P_{Slip} = T_{Vs} \times (N_{IM} - N_{Vs}) / 973 \text{ (kW)} \quad (3)$$

$$P_{Mec} = T_{Mec} \times N_{IM} / 973 \text{ (kW)} \quad (4)$$

여기서 機械損토크 T_{Mec} 는 渦電流 커플링의 회전수에 관계 없이 거의 일정하다. 이는 機械損의 대부분이 일정속도로 회전하는 드림에 설치된 냉각용 팬의 機械損失이기 때문이다.

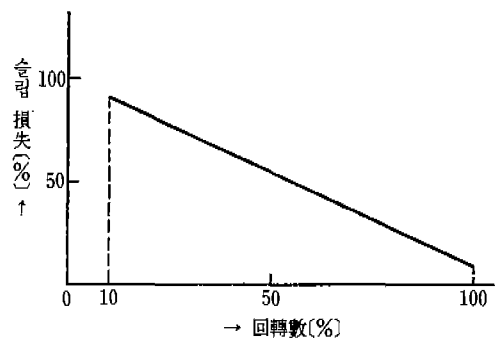
3. 슬립 損失과 負荷 特性

가. 定토크 特性의 경우

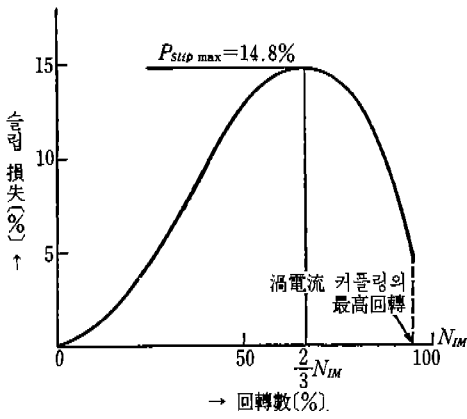
負荷토크가 定토크인 경우는 슬립 損失은 출력회전수 N_{Vs} 가 적을수록 적어진다. 이 관계를 그림 9에 표시한다.

制御範圍가 10 : 1의 경우 최저회전수에서의 슬립 損失은 誘導電動機 出力의 약 90% 정도가 된다.

최고회전수에서의 슬립 損失은 渦電流 커플링의 최고회전수가 誘導電動機의 출력회전수의 몇 %까지 올릴 수 있는가에 따라 결정된다. 일반적으로 渦電流 커플링의 출력이 커질수록 최고회전수는 誘導電動機의 정격회전수에 가까워져 슬립은 적어진다. 250 kW 이하에서는 誘導電



<그림 9> 定토크시의 슬립 損失



<그림 10> 2속遞減 토크시의 슬립 損失

動機 出力의 6~10% 슬립 損失이 되며 이를 초과할 때는 2~4% 슬립 損失이 된다.

나. 2속遞減 토크 特性

負荷가 펌프나 팬과 같은 遞減토크 特性의 경우는 (3) 식의 出力토크가

$$T_{vs} = k \cdot N_{vs}^2 \quad (5)$$

다만, k : 定數

와 같이 되어 (3) 식은

$$P_{slip} = k \cdot N_{vs}^2 (N_{IM} - N_{vs}) / 973 \quad (6)$$

와 같이 변화한다.

(6) 식을 프로트하면 그림 10과 같이 되어 최대치 $P_{slip \max}$ 는,

$$\frac{dP_{slip}}{dN_{vs}} = \frac{k}{973} (2N_{vs} \cdot N_{IM} - 3N_{vs}^2) = 0 \quad (7)$$

에서 出力軸 回轉數가 誘導電動機 回轉數의 2/3일 때 최대로, 그 값은

$$P_{slip \max} = 0.148k \cdot N_{IM} \text{ (kW)}$$

즉, 機械損을 무시하면 誘導電動機 出力의 약 15%가 된다. 따라서 定토크일 때의 최대치 90%에 비하여 약 17%가 되는 것을 알 수 있다.

4. 各種 드라이브 시스템과의 비교

渦電流 커플링은 슬립 損失을 동반하며 가변

속하는 電動機로서, 수요는 느리기는 하지만 늘어나고 있는 추세인데, 전체적으로는 아직 일반적인 可變速機가 주류가 되어 있다고 생각된다.

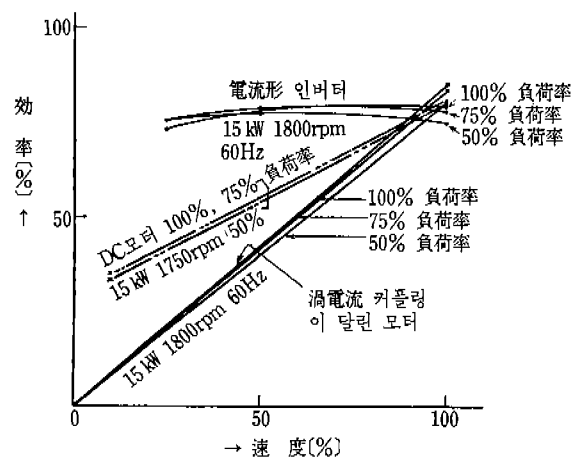
그것은 渦電流 커플링 특유의 우수한 점이 있어 그 장점이 많은 수용가의 인정을 받아 사용되고 있는 것으로 생각된다. 그러면 다른 可變速 드라이브와 비교하여 어떠한 특징이 있는가 상세하게 검토하여 보기로 한다.

우선 電流形 인버터, 直流모터와 渦電流 커플링과를 비교해 본다.

그림 11은 시스템 종합효율에 대한 비교이다. 이에 의하여 단순한 효율비교를 하면 90% 회전수 이상에서는 渦電流 커플링部 모터가 유리한 것을 알 수 있다. 일반적으로 電力料金は 力率과의 관계에서 구하여야 하고 力率과 効率의 곱을 가지고 評價關數로서 정리하면 표 1과 같이 된다. 이에 의하여 70% 회전수 이상은 渦電流 커플링을 설치한 모터가 유리한 드라이브라 할 수 있다.

물론 이것만이 可變速電動機의 評價關數는 아니다. 이밖에도 종합적인 라이프사이클에서의 필요경비를 포함하여 평가하여야 한다. 즉,

(1) 구입비용: 드라이브 시스템 전체의 구입 비용, 특히 VVVF에서는 電源에의 나쁜 영향



<그림 11> 각종 드라이브 시스템 効率

<표 1> 각종 드라이브의 종합평가

	回轉數	効率	力率	評價關數
渦電流 커플링	100%	85.5	89	76.1
	90%	77.0	89	68.5
	80%	68.0	89	60.5
	70%	60.0	89	53.4
電流形 인버터	100%	79.5	85	67.4
	90%	79.8	76.5	61.0
	80%	79.9	68	54.3
	70%	79.5	59.5	47.3
D C 모 터	100%	81.5	87	70.9
	90%	76.5	78.3	59.9
	80%	71.0	69.6	49.4
	70%	66.0	60.9	40.0

을 없애기 위하여 절연 트랜스를 설치하여야 한다. 또 負荷에의 토크리플이나 電動機에의 波形 일그러짐을 줄이기 위하여 相數增加(6相, 12相 등)를 하여 電動機와 연결하는데 出力 트랜스를 설치할 때가 있다. 이들에 대하여도 고려할 필요가 있다.

(2) 설치공사비 : 大容量機에서는 VVVF나 直 流 드라이브의 경우는 制御盤 또는 電氣空의 냉 각 혹은 환기를 해야 할 때가 있다. 이러한 비용도 고려하여야 한다.

(3) 停止時間損失費用 : 어떠한 사고가 발생하여 工場이 쉬었을 때 복귀에 필요한 시간을 고려하여 이 때의 生産停止에 의한 손실도 고려하여야 한다.

(4) 保守費用 : 修理費用, 保守費用, 豫備品購 入費, 保守作業員養成費 등이 최소가 되도록 고려하여야 한다. 특히 이밖에 드라이브 시스템 전체의 신뢰성을 충분히 評價하여 둘 필요가 있다.

이상의 4개 項目을 포함한 개개의 사례를 종합적으로 검토하여 어느 드라이브 시스템이 가장 적합한가를 판단하여야 하겠다.

5. 渦電流 커플링의 유효한 使用法

渦電流 커플링은 앞서 기술한 바와 같이 渦電 流損失이 발생하기 때문에 定토크 特性으로 低 速領域에서 긴 시간을 사용하는 용도에 대해서는 効率的인 사용법이 있다고 하기 어렵지만 대 부분이 最高速度 부근에서 사용되고 短時間의 低速領域에서 사용하는 경우가 많아 이러한 때 는 유효하다.

또 펌프나 팬 등과 같이 負荷 特性이 2승체감 의 경우는 渦電流損失은 적고 可變速함으로써 얻는 動力節減량이 크기 때문에 매우 유효하다. 이런 점에 대하여 상세하게 검토해 보기로 한 다.

가. 定토크 特性

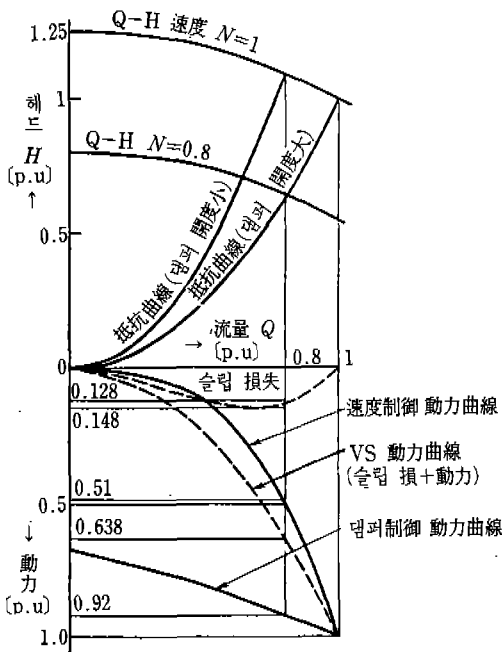
일반적으로 프레스, 押出機, 成形機, 각종 컨 베이어, 피더, 卷取機 등은 비교적 최고회전수 부근에서의 사용이 많고 최저회전수 부근에서 의 사용은 단시간이거나 또는 빈도가 적다.

그렇기 때문에 러닝코스트는 그다지 문제가 되지 않으며 이니셜코스트가 값이 싸고 구조적 으로 단순하며 또 견고하여 신뢰성이 높고 정지 시간 손실도 적으므로 保守費用이 적게 드는 渦 電流 커플링을 설치한 電動機가 유효하게 된다.

나. 風水力機械에의 적용

펌프나 팬과 같은 遠心式의 風水力機械는 그 토크 특성이 일반적으로 속도의 2승에 비례한 다. 이들을 速度制御하면 速度의 3승에 비례하 게 되어 動力이 절감된다.

지금 理想的인 2승체감특성의 팬을 가정하여 이를 토출구 댐퍼制御를 하였을 때, 슬립 損失 이 없는 速度制御(VVVF 등)했을 경우 渦電流 커플링이 설치된 모터로 速度制御했을 때의 필 요동력을 계산하여 單位法으로 표시한 것은 그 림 12와 같다. 이 曲線은 誘導電動機의 손실이 포함되지 않았기 때문에 필요동력의 絕對値는 정확하지는 않으나 3者의 差를 계산하여 평가



<그림 12> 속도제어동력곡선

할 때는 즉시 이용이 된다.

그림 12를 이용하여 100% 속도로 1000 kW의 동력을 필요로 할 때의 각종제어를 하는데年間電力料金の 차를 계산하여 보기로 한다.

電力料金は 50원/kWh로 하고 1년을 8000시간이라 가정한다. 또 연평균 거의 80%의 풍량을 사용하고 있는 것으로 한다.

(i) 댐퍼제어

$$1000 \times 0.92 \times 50 \times 8000 = 36,800 \text{ [만원]}$$

(ii)渦電流 커플링

$$1000 \times 0.638 \times 50 \times 8000 = 25,520 \text{ [만원]}$$

(iii) 슬립 로스레스 제어

$$1000 \times 0.51 \times 50 \times 8000 = 20,400 \text{ [만원]}$$

이상으로 댐퍼제어에 비하여渦電流 커플링 및 슬립 로스레스(Slip Lossless) 제어(VVVF 등)는 표 2와 같은 메리트가 있다.

슬립 로스레스 제어는渦電流 커플링에 대하여 슬립로스(損失)만큼의 메리트가 표 2와 같이 나타나게 된다. 그러나渦電流 커플링은 슬립로스

<표 2> 댐퍼제어에 대한 메리트

	메리트/年間
渦電流 커플링	11,280만원
슬립 로스레스 제어	16,400만원
(1000 kW 팬을 80% 제어)	

레스제어에 비하여 다음과 같은 메리트를 가지고 있다.

(1) 購入費가 싸다

渦電流 커플링의 경우 購入費를 포함한 初期 투자자본을 약 1~1.5년에 완전히 回收할 수 있다. 슬립 로스레스제어의 경우는 수년 이상 걸린다.

(2) 토크리플이 전무하다

渦電流 커플링은 매끄러운 드럼 표면에 연속적으로渦電流를 발생하여 그와 磁界와의 상호작용으로 토크를 발생한다. 이 토크는 회전에 따른 리플이 전혀 없고 負荷機械와 共振하여 생각지도 않았던 事故를 발생시키는 일도 전혀 없다. 따라서 안심하고 風水力機械와 연결할 수 있다. VVVF 등의 경우는 토크리플이 생겨 이것이 機械系와 무엇인가의 固有振動과 共振하여 생각지도 않았던 故障사고가 발생할 때가 있다.

(3) 電源에의 나쁜 영향이 없다

VVVF와 같은 轉流서지 등은 발생하지 않기 때문에 電源에의 나쁜 영향은 전혀 없다.

(4) 電動機의 高周波損失의 증대가 없다

VVVF의 경우는 波形 일그러짐에 의한 電動機의 高周波過熱을 국부적으로 발생하는 때가 있다. 따라서 기설의 낡은 電動機에 대하여는 특히 주의하여야 한다.渦電流 커플링의 경우는 이와 같은 문제는 일어나지 않으므로 안심하고 기설품에도 적용된다.

(5) 電氣空의 설치면적이 좁아도 된다

渦電流 커플링의 制御電源은 電動機容量의 거의 1% 이하이다. 그 때문에 制御盤이 적어도 되므로 기설품에 추가할 때 등에 電氣室의 면적은 문제가 되지 않는다.

(6) 保守點檢이 容易

渦電流 커플링은 구조가 단순하고 튼튼하기 때문에 保守하는 부분은 軸반이와 大形機의 슬립링 정도이다. 制御盤은 渦電流 커플링이 1000 kW 급에서도 8kW 정도이기 때문에 사이즈도 적고 부품대수도 적다. 그렇기 때문에 전체적으로 보수가 용이하고 保全費用이 적어도 된다.

(7) 信賴性이 높은 絶緣

渦電流 커플링의 卷線은 도너츠形의 단순한 卷線이 1개 또는 10數개 감겨있을 뿐이다. 絶緣은 글라스에이프로 되어 있어 이에 에폭시수지를 眞空흡착하여 耐環境性이 우수하고 신뢰성이 높은 것으로 되어 있다.

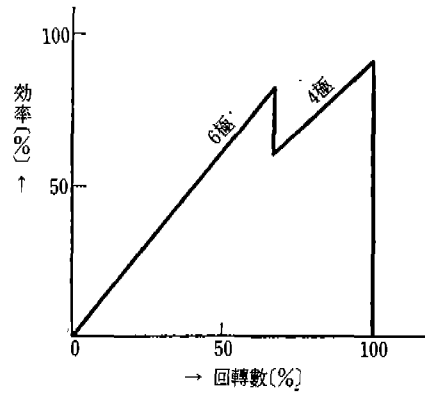
이상과 같이 渦電流 커플링은 VVVF 등에 비하여 경제적이고 신뢰성이 높은 것으로 되어 있다. 다만, 회전부가 2개 있음으로써 구조적으로 고속회전으로 만들기 어려운 것이 하나의 弱點이다. 즉 2極機種은 대략 37kW 정도, 4極機는 710kW 정도, 6極機는 1000kW 정도, 8極機는 2000kW 정도가 한도로 되어 있다. 따라서 이를 초과하는 것에 대하여는 VVVF 등을 선정할 필요가 있다.

다. 既設器에 끼워넣을 경우

기설의 一定速電動機로 구동되는 風水力機械에 渦電流 커플링을 끼워 넣어 可變速시킬 때는 渦電流 커플링을 설치하는 面積만 확보되어 있으면 앞서 기술한 7項目的 메리트가 있기 때문에 안심하고 적용할 수 있다.

라. 既設 VS 모터의 에너지使用合理化

비교적 中程度의 回轉數에서 많이 사용하는



<그림 13> 4/6極切換 모터가 달린 渦電流 커플링의 效率

既設의 渦電流 커플링이 있을 때는 驅動모터를 4/6 또는 4/8極數變換形으로 개조함으로써 에너지使用合理化의 효과를 올릴 수 있다. 그림 13은 15kW의 예이나 50% 회전으로 4極에서는 약 54%였던 것이 73%까지 개선된 것이 된다.

年間 8000時間 50원/kWh로서 50% 회전시의 메리트를 계산하면

$$(15/0.54 - 15 \times \frac{4}{6} / 0.73) \times 50 \times 8000 = 5,625,000 \text{ [원]}$$

이 된다. 이 값은 電動機의 코스트면에서 볼 때 고려할 가치가 있다고 본다.

☆ ☆ ☆

이상과 같이 渦電流 커플링의 효율적인 사용 방법에 대하여 기술하였다. 渦電流 커플링의 수요는 해마다 조금씩이기는 하나 꾸준히 늘어나고 있으며, 그 最大需要容量도 점차 많아지고 있다. 그것은 半導體技術의 진보로 트랜지스터 인버터의 技術的인 발전이 눈부시기 때문으로 본다.

이러한 현상은 渦電流 커플링이 低코스트이고 단순하며 견고하고 시스템으로서도 높은 신뢰성이 있어 수용가들에게 애호를 받고 있기 때문이다.

▣ 다음 호에 계속