

유도전동기의 Solid-state 구동장치 —“Adjustable Speed AC Drive Systems”에서—

李 光 遠* 譯

■ 目 次 ■

- 1. 서
- 2. 유도전동기의 구동방식
- 3. 구동장치의 제어
- 4. 구동방식의 요약비교

「역자주 : 다음은 1981년에 간행된 IEEE 논문집 “Adjustable speed ac drive systems”중에서 편수자 B.K. Bose의 서문 및 개설을 발췌, 번역한 것이다. 원문은 교류기의 구동에 관한 것이어서 동기기도 다루었으나, 여기에서는 유도전동기 부분만을 발췌하였다. 유도전동기의 가변속도 구동은 여기에서 언급한 solid-state방식 이외에도 극수변환이나 전자커패시팅 방식이 있으며, 전자커패시팅 방식의 경우 가격이나 실용성 문제로 아직도 널리 이용되고 있음을 첨언하여 둔다.」

1. 서

교류전동기를 위한 solid-state 속도제어기술은 지난 15년간 괄목할 만한 발전을 계속하였다. 1950년대 말 thyristor가 출현하면서 우선 직류전동기 구동장치에 응용되었지만 1960년대 초부터 여러가지의 훌륭한 정류방법을 갖는 inverter가 고안됨으로써 곧 교류전동기의 구동에도 이용되었다.

그러나, 교류전동기가 직류전동기에 비하여 가지는 여러가지 성능상의 장점에도 불구하고 아직껏 교류전동기 구동을 잘 채택하지 않는 까닭은 구동장치가 값이 비싸고 복잡하기 때문이다. 이러한 단점을 극복하려는 연구개발이 그동안 많이 추진되어, thyristor와 전력용 transistor는 용량은 점점 커지고 값은 싸졌으며, 구동장치는 점차 module화 되어 실장에 필요한 비용이 줄었고, 제어용 전자회로도 LSI기술이나 micro-computer의 응용으로 가격의 저렴화를 위하여 노력하고 있다. 이와 같은 기술적인 동향을 감안할 때 멀지않

은 장래에 교류구동장치들이 널리 실용화되리라 예견된다.

교류전동기의 속도는 회전자장은 만들어 주는 전원 주파수와 관련되어 있다. 속도를 증가시키기 위하여 주파수를 올리면 자화리액턴스의 증가로 자화전류가 감소하고 따라서 공극자속이 감소하므로 이에 수반하여 출력 torque가 저하한다. 그러므로 교류전동기 속도제어에는 대개의 경우 가변전압 가변주파수 전원이 필요하게 된다. 이러한 전원을 만들자면 중간단계에 적류모션을 두어 전압을 가변시킬 수 있어야 한다. Solid-state converter를 사용하여 교류전동기를 구동할 때 성능상의 가장 큰 단점은, 교류전원을 switching에 의하여 만들기 때문에 고조파에 의한 과열과 torque의 맥동이 생기는 것, 그리고 전력용 반도체를 사용하기 때문에 과부하내량이 감소하는 것이다. 또한 부하측에서 봤을 때 변압기로 공급되는 상용전원에 비하여 상당한 정도의 전원 impedance를 갖기 때문에 안정도를 나쁘게 하는 점도 들 수 있다.

2. 유도전동기의 구동방식

유도전동기의 속도는 회전자의 동기속도와 slip에 의하여 정하여 진다. 따라서 유도전동기의 속도제어는 이 두 가지 중 하나, 또는 두 가지 모두를 바꿀 수 있으면 된다. 그 방법들로서는

- 1) 가변전압 제어(고정자전압 제어)
- 2) 가변전압 가변주파수 제어
- 3) 가변전류 가변주파수 제어
- 4) 2차전력 제어

를 생각할 수 있다.

* 正會員 : 亞州大 工太 電子工學科 教授

가. 고정자전압 제어에 의한 구동

농형 유도전동기 구동의 가장 간단한 방법으로서 thyristor 또는 triac의 점화각을 조절함으로써 고정자의 전압을 변화시키는 것이다. 기동 torque가 크게 요구되지 않는 펌프, 송풍기 등의 부하에 적합하며, 전동기로서는 slip이 큰 것을(10~12%) 사용한다.

고정자 전압이 감소함에 따라 공급자속이 감소하고 따라서 torque도 감소하는 문제점이 있고, 또 저속으로 운전할 수록 효율이 나빠지고 고조파 성분이 증가하는 결점이 있다.

나. 전압원 inverter 구동

전압원 inverter에는 구형파 inverter와 PWM inverter 두 가지가 있다. 그림 1은 구형파 inverter의 구성이다. 직류전압의 크기는 제어정류기로 변화시키고 (diode 정류기와 chopper를 사용하여도 된다.) 주파수는 inverter로 변화시키는데, 중간에 filter에 커패시터 C를 사용하여 부하측에서 본 전원 impedance를 작게 하였으므로 전압원으로 볼 수 있다.

전동기는 slip이 작은 것을 사용하며, 동기속도를 변화시켜 속도제어를 하기 때문에 효율이 좋다. 부하가 유도성이므로 inverter의 thyristor는 강제정류가 필요하지만 저출력 전동기의 구동에서는 정류가 필요없

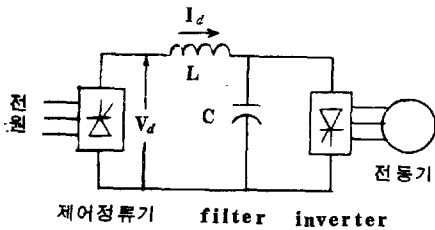


그림 1. 구형파 inverter의 구성

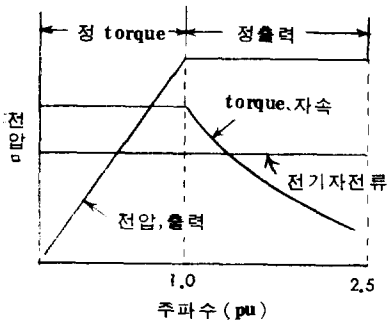


그림 2. 유도전동기 전압 및 torque의 조정

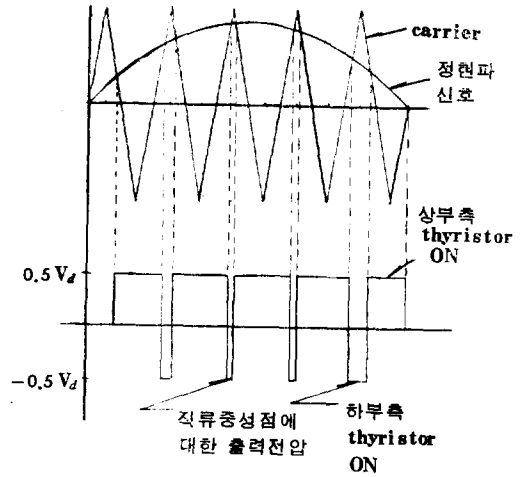


그림 3. PWM inverter의 원리와 파형

는 전력용 transistor를 사용하여도 좋다.

주파수의 변화에 따른 전압, 전류, 자속, torque, 출력의 조절은 그림 2와 같이 정격주파수 이하에서는 정자속이 되도록 하고 정격주파수 이상에서는 자속을 감소시켜 정출력이 되도록 한다.

다. PWM inverter 구동

그림 1에서 정류기에는 diode 정류기를 사용하여 직류전압을 고정시키는 대신 inverter를 PWM구동함으로써 주파수와 전압을 동시에 바꾸는 것이다. 그림 3에 PWM inverter의 원리와 파형을 보여 주고 있다.

PWM inverter의 제어에는 microcomputer가 아주 적합하며, 출력의 고조파 분은 구형파 inverter에 비하여 작게 할 수 있으나, 효율은 정류 회수의 증가때문에 좋지 않다. 직류 link의 전압을 바꾸지 않으므로 여러대의 inverter를 한 정류기에 연결 운전할 수 있어 정류기의 비용을 절약할 수 있고, 축전지를 사용하면 정전에 대한 대책도 가능한 장점이 있다.

라. 전류원 inverter 구동

그림 1에서 filter의 C를 없애면 L이 큰 경우 전류원으로 생각할 수 있다. 이 전류의 크기를 제어정류기로 조절하고 주파수는 inverter로써 조절하여 가변전류 가변주파수 교류전원을 만든다. 전류원 구동을 하면 전동기의 단자전압은 정현파에 가깝게 된다.

전류원 inverter는 전압원 inverter에 비하여 신뢰성이 높고 간헐적인 정류실패에도 안전한 장점을 가지고 있으며, inverter측의 고장에 대하여도 정류기측에서 쉽게 대처할 수 있다. 또한 회생제동도 제어정류측의

전압만 역극성으로 하여 줌으로써 간단히 된다. 그러나, 응답속도가 느리고 주파수 범위가 낮으며, 무부하에 사용이 곤란한 단점이 있다.

다. Cycloconverter구동

Cycloconverter는 전압과 주파수를 바꾸기 위하여 정류기-inverter의 2단계 변환을 이용하지 않고 점호각만을 변조하는 1단계 변환장치이다. 출력 주파수는 0에서부터 전원주파수의 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 까지의 범위로서 전원주파수보다 낮추는 것만이 가능하다.

Cycloconverter의 역률은, 점호위상각을 변조하여 동작하는 것이기 때문에, 전동기측의 역률에 관계없이 항상 지역률이 되고 출력전압을 낮출 수록도 전동기측의 역률이 낮을 수록 더 나빠진다. 이 구동방식의 한가지 장점은 회생제동이 간단하고 4상한 운전이 쉬운 것이지만, 장치가 복잡하고 비싸기 때문에 저속 대용량 전동기에나 이용된다.

바. 정지형 Kramer 구동

권선형 전동기에 적용할 수 있는 구동방식으로서 회전자의 등가저항을 바꾸어 줌으로써 비례추이의 원리를 이용한 것이다. 이때 회전자의 slip전력은 그림 4와 같이 inverter를 이용하여 전원에 반환하는데 이 반환하는 전력의 크기에 비례하여 전동기의 slip이 정하여 지므로 slip이 0보다 커서 동기속도보다는 낮은 속도 범위에서만 속도조절이 가능하다.

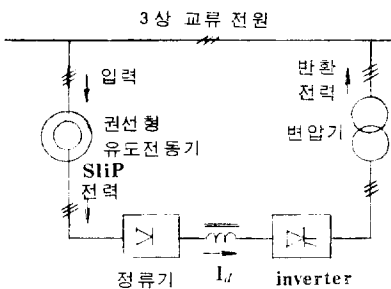


그림 4. 정지형 Kramer구동

회전자의 전압과 주파수가 일정하기 때문에 전동기의 공극자속은 거의 변하지 않고 따라서 torque가 회전자 전류에만 비례하므로 타터 직류전동기와 유사한 특성을 갖는다. 회전자측의 변환장치 용량은 slip전력의 크기와 같으면 되므로 전속도범위에서 운전한다면 전동기의 용량과 같아야 하고, slip을 제한하면 그만큼 줄일 수 있다. 이 구동방식은 역률은 좋지 않으나,

속도범위가 제한되어 있는 대형 펌프나 송풍기의 구동에 적합하다.

사. 정지형 Scherbius 구동

정지형 Kramer 구동에서 slip 전력의 흐름이 양 방향 모두 가능한 변환장치를 사용하면 동기속도보다 높은 속도로도 운전할 수 있는데 이렇게 만든 것이 정지형 scherbius 구동이다. Slip전력이 양방향으로 모두 흐를 수 있게 하는 방법으로는 그림 4에서 diode 정류기 대신 thyristor bridge를 사용하거나 아예 정류기-inverter 전체를 cycloconverter로써 대체하는 방법이 있다.

이 구동장치로 동기속도의 $\pm 50\%$ 까지 속도조절을 한다고 생각하면 전동기 용량의 $\frac{1}{2}$ 용량을 갖는 변환장치로써 100% 범위의 속도조절이 가능한 셈이 된다. 이 구동방식도 정지형 Kramer 구동이나 마찬가지로 속도범위가 제한되어 있는 대용량 전동기에 적합하다.

3. 구동장치의 제어

구동장치의 제어방식도 여러가지가 있을 수 있으므로 용도와 요구조건에 맞추어 적절히 설계하여 사용하여야 할 것이다. 일반적으로 ‘속도제어’라는 말로 많이 부르고 있지만 전류, torque, 또는 위치를 제어하는 loop를 같이 가지고 있는 경우가 많다. 제어 loop가 이렇게 다중화 된 계통에서는 외부 loop가 다음 단계의 내부 loop에 필요한 지령을 만들며 내부 loop로 갈 수록 점차적으로 응답이 빠르게 설계한다. 제어의 주된 목적이 과도응답과 정상상태의 오차를 주어진 사양 안에 들어오게 하는 것이지만, 효율이나 고조파의 개선 그리고 변환장치의 고장시에 대한 문제도 함께 고려하여 주어야 한다.

가. Modeling과 simulation

교류기의 동특성은 대단히 복잡하기 때문에 구동장치를 제작하기 전에 대개 simulation을 통하여 성능을 예측할 필요가 있다. simulation을 하기 위한 전동기의 동특성 model은 비선형 미분방정식으로 표현되며 변환장치의 model은 switching topology를 그대로 표현하거나 아니면 이산적인 효과만은 무시하고 나타내기도 한다. 상기방법과는 달리 구동장치와 기계전체의 동작을 정상상태의 운전점 주위에서 소량의 교란으로 보면 계통 전체를 선형화한 model로도 표현이 가능하다.

Simulation에 사용하는 컴퓨터르는 digital, analog,

어떤 형이든 가능하다. 변수들의 시간에 따른 변화는 순간순간 관찰하는 데는 analog computer가 편리하며, microcomputer 제어방식을 채택하는 경우는 digital computer에 의한 simulation이 필요할 것이다.

나. 고정자전압 제어

그림 5와 같이 지령속도 ω^* 와 측정속도 ω 를 비교하여 그 오차를 속도조절기를 통함으로써 점호자 신호를 발생시킨다. 속도조절기는 $(1 + T_1S)/(1 + T_2S)$ 의 lag-lead형으로도 또는 $K_1 + \frac{K_2}{S}$ 의 P-I형으로도 설계할 수 있는데 P-I형이 정상상태의 오차를 0으로 만드는 장점이 있다.

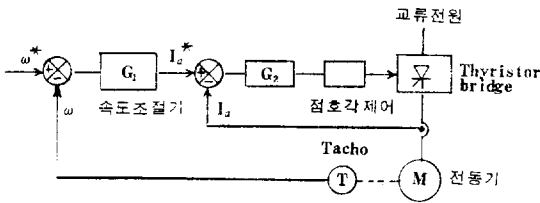


그림 5. 고정자전압 제어

다. 전압원 inverter 속도제어

간단한 형태는 Hz당 전압을 일정하게 하는 방식으로서 그림 6과 같이 구성된다. 그림 6에서 전동기속도 ω 가 기준속도를 넘으면 inverter에의 주파수지령 ω_c 는 그대로 증가시키지만 정류기에의 전압지령 V_c^* 는 고정시켜 약제자 제어를 행한다.

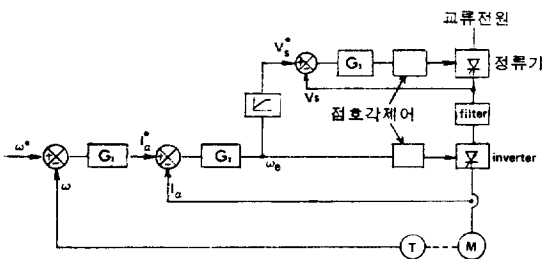


그림 6. 정자속 제어

아주 개선된 제어방식으로서 자속과 torque를 모두 폐-loop 제어하는 방식을 그림 7에 보여주고 있다. torque loop에서는 지령torque T^* 와 전동기 torque T 의 오차로 slip지령 ω_{sl} 을 만들고 여기에 측정속도를 더하여 inverter에의 주파수지령 ω_c 를 만든다. 한편 자속 loop의 오차는 전류지령 I_s^* 을 만들는데 이때 공극

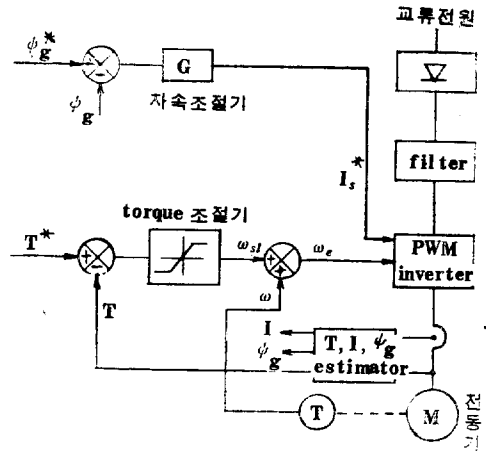


그림 7. PWM inverter의 torque 및 자속조절

자속 ψ_s 는 일정하게 제어할 수도 있고 효율을 증가시키기 위하여 torque에 따라 program할 수도 있다. 자속과 torque의 제환신호는 전압과 전류로부터 계산되기 때문에 계산 model의 정확성이 제어의 정확성을 좌우한다.

최근에는 Siemens에서 창안한 공극자장에 관점을 둔 제어가 많은 관심을 모으고 있다. 이 방식은 벡터의 변환에 기초를 두었기 때문에 transvector 제어라고도 불리는데, 그 원리는 교류기의 고정축에 대한 성분인 고정자 전압과 전류를 회전자와 동기회전하는 축에 대한 성분으로 변환하면 직류성분이 되므로, 직류기와 같은 방식으로 제어계통을 구성함으로써 과도특성을 좋게하는 것이다. 좀더 설명하면 다음과 같다. 회전자장의 중심축을 회전직축이라 하고 이 축과 전기적으로 90°를 이루는 축을 회전횡축이라 하면, 회전자속 ψ_s 는 회전직축에 기저력을 만드는 전류 i_d 에 비례하고 회전횡축전류 i_q 에는 영향을 받지 않으며, torque는 i_d 와 i_q 의 곱에 비례하므로 직류기에서와 같은 형태의 식을 얻을 수 있다. 그러므로 i_d, i_q 에 대하여 직류기와 똑같은 제어 loop를 만들고 이것을 고정자의 전압, 전류지령으로 변환하여 주면 된다. 이 방식을 그림 8

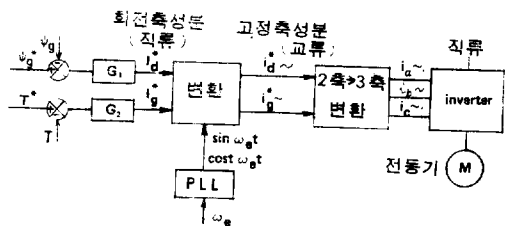


그림 8. 자장제어 계통의 구성

에 보인다. 이 제어방식은 hardware로는 구성하기가 힘들지만 microcomputer로는 실현이 가능하다.

라. 전류원 inverter의 속도제어

속도제어 면에서는 전류원 inverter가 전압원 inverter에 비하여 불안정하고 open loop제어가 불가능한 단점이 있다. 전류원 inverter 속도제어 방식의 간단한 형태로 그림 9와 같이 slip ω_s 를 일정하게 하여 주는 것을 생각할 수 있는데 이 방식의 단점은 공극자속이 넓은 범위에서 변하여 특성이 좋지 않은 것이다.

개선된 방식으로 그림 10이 있다. 이 방식은 그림 7에서와 같이 torque와 자속을 모두 제어하는 것이다. 이 방식을 약간 변형하면 일정출력-약제자 제어도 가능하다.

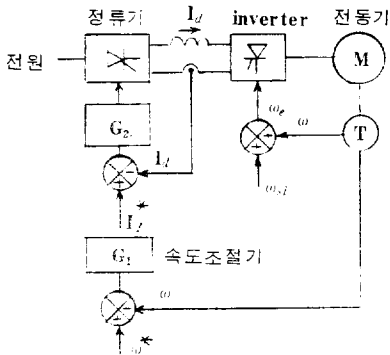


그림 9. 전류원 inverter의 정 slip제어

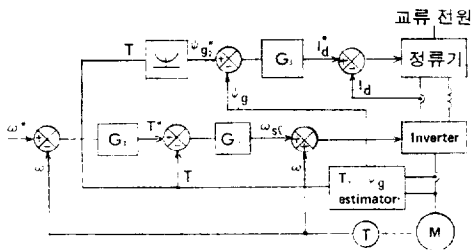


그림 10. 전류원 inverter의 자속, torque조절

마. Slip 전력 반환 속도제어

정지형 Kramer 구동장치는 전술한 바와 같이 타력 직류 전동기와 특성이 유사하여 속도제어도 그림 11처럼 직류기와 똑같은 간단한 방식이다.

바. Microcomputer 제어

상술한 각종 방식의 block diagram들은 hardware

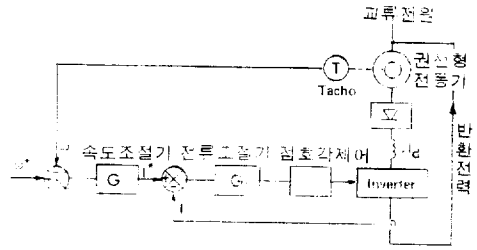


그림 11. 정지형 Kramer구동의 속도제어

로써도 구성할 수 있고 microcomputer를 사용한 software로써도 구성할 수 있다. microcomputer를 사용하면 hardware가 간단해 지므로 장치의 신뢰도를 향상시킬 수 있고 복잡한 제어방식도 실현이 가능하다. 다만 처리속도가 문제일 수 있는데 이 점은 복수 processor의 채택으로 해결할 수 있다. 앞으로는 한 개의 VLSI chip으로써 아무리 복잡한 제어방식이라도 실현이 가능하여 질 것이다.

4. 구동방식의 요약비교

가. 고정자전압 제어

- 1) 속도범위 : 동기속도 이하, 최저속도는 제한함
- 2) 회생제동 : 전기제동 가능
- 3) 고 조 파 : 심함
- 4) 토크맥동 : 맥동주파수가 높아 문제없음
- 5) 역 물 : 나쁨
- 6) 가 격 : 저렴, 간단한 제어회로
- 7) 효 율 : 나쁨
- 8) 용 도 : 중요량까지의 펌프 및 송풍기, 가전기기
- 9) 비 교 : slip이 큰 농형전동기 필요

나. 구형파 inverter

- 1) 속도범위 : 중속에서 고속까지 가능, 약 10 : 1
- 2) 회생제동 : 전기제동 가능, 전원측 정류기를 converter로 대체하면 회생제동 가능
- 3) 고 조 파 : 낮은 주파수에서 고조파에 의한 전동기 발열이 큼
- 4) 토크맥동 : 낮은속도에서 약간 문제
- 5) 역 물 : 나쁨
- 6) 가 격 : 비쌌, transistor형은 약간 저렴
- 7) 효 율 : 보통, transistor형은 약간 좋음
- 8) 용 도 : 중소용량급 일반산업용
- 9) 비 교 : open loop제어 가능

다. PWM inverter

- 1) 속도범위 : 넓음, 0속도까지 가능
- 2) 회생제동 : 전기제동가능, 전원측 정류기를 converter로 대체하면 회생제동 가능
- 3) 고 조 파 : 거의 정현파
- 4) 토크맥동 : 극소
- 5) 역 물 : 거의 1
- 6) 가 격 : 꽤 비쌘, transistor형이 약간 저렴
- 7) 효 율 : 좋음, transistor형으로 더욱 개선
- 8) 용 도 : 소용량부터 대용량까지의 일반산업용
- 9) 비 고 : open-loop제어 가능, 과도응답 빠름, 제어 복잡

라. 전류원 inverter

- 1) 속도범위 : 넓음, 0속도까지 가능
- 2) 회생제동 : 4상한 운전 간단
- 3) 고 조 파 : 고조파 발열 심함
- 4) 토크맥동 : 저속에서 약간 문제
- 5) 역 물 : 나쁨
- 6) 가 격 : 비쌘
- 7) 효 율 : 꽤 좋음
- 8) 용 도 : 중용량 및 대용량 산업용
- 9) 비 고 : 정류 간단, open-loop제어 불가능

마. Cycloconverter

- 1) 속도범위 : 0부터 전원동기속도의 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 까지
- 2) 회생제동 : 4상한 운전 간단
- 3) 고 조 파 : 거의 정현파

- 4) 토크맥동 : 극소
- 5) 역 물 : 나쁨
- 6) 가 격 : 비쌘, 제어가 복잡
- 7) 효 율 : 좋음
- 8) 용 도 : 저속 대전력 전동기, 디젤 기관차
- 9) 비 고 : 빠른 응답

바. 정지형 Kramer

- 1) 속도범위 : 동기속도이하, converter용량에 따라 최저속도 제한받음
- 2) 회생제동 : 불가능
- 3) 고 조 파 : 6-step 전류파형
- 4) 토크맥동 : 있음
- 5) 역 물 : 나쁨
- 6) 가 격 : 보통, 전동기 가격이 비쌘
- 7) 효 율 : 좋음
- 8) 용 도 : 속도범위가 제한된 대형 펌프 및 송풍기
- 9) 비 고 : 기동저항 필요

사. 정지형 Scherbius

- 1) 속도범위 : 동기속도 전후, converter 용량으로 범위 제한
- 2) 회생제동 : 회생제동 가능, 역전 불가능
- 3) 고 조 파 : cycloconverter라는 거의 정현파
- 4) 토크맥동 : 극소
- 5) 역 물 : 나쁨
- 6) 가 격 : 비쌘, 전동기 가격도 비쌘
- 7) 효 율 : 좋음
- 8) 용 도 : 속도범위가 제한된 대형 펌프 및 송풍기
- 9) 비 고 : 기동저항 필요