전력전자학술대회 논문집 2003. 7. 14 ~ 7. 17

원가절감형 IGBT스택 개발

홍순찬, 강경우, 정우창, 황용하*
단국대학교 전기공학과, (주)베가파워*

Development of IGBT Stacks for Cost Reduction

S.C. Hong, K.W. Kang, W.C. Jung, and Y.H. Hwang*
Dept. of Electrical Eng., Dankook University, Vega Power Co.*

ABSTRACT

This paper deals with the development of IGBT stacks for cost reduction. One stack is consist of 4 IGBTs in parallel. In the high- and mid-power converters, IGBT stacks are more suitable than single IGBTs in the aspects of total cost of semiconductor devices, time for purchasing, maintenance, radiation of heat, size of surge absorber and harmonic filter, frequency characteristics, and etc.. Problems accompanied by parallel construction are studied and solved. Economical efficiency is discussed and field tests with 100kVA UPS are carried out to verify the validity of the developed IGBT stacks.

1. 서 론

근래에 이르러 각종 산업기기들의 정밀 제어에 대한 요구가 급증하고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 정류기, 초퍼, 인버터 등의 전력변환장치가 필요한데, 이들 전력변환장치에는 전력용 반도체소자의 사용이 필수적이다.

초기에는 반도체소자의 전력용량 문제로 SCR과 같은 사이리스터가 사용되었으나 90년대에 이르러 Power Transistor의 대용량화가 실현되면서 현재는 중대용량 전력변환장치에도 Power Transistor가 스위칭소자로 많이 사용되고 있다. 대표적인 전력변환장치로는 직류전력을 교류전력으로 변환하는 인버터가 있다.

현재 Power Transistor중에서는 IGBT가 가장 많이 사용되고 있다. 인버터에서 스위칭소자로 단일 IGBT소자를 사용하면 30kVA 정도까지는 관계없으나 그 이상 용량의 전력변환장치에서는 여러 가지 문제가 발생한다.

중대용량의 전력변환장치에서 대용량의 IGBT소자를 한 개 사용하는 대신에 그보다 낮은 용량의 소자를 여러 개 병렬로 사용하면 단일소자 사용시의 문제점은 해결할 수 있지만 병렬구조에 따른 또 다른 문제가 발생한다.

본 연구에서는 중대용량 전력변환장치에서 스위칭소자로 단일 IGBT소자 사용시의 문제를 해결하기 위해 여러 개의 소자를 병렬로 사용할 때 발생하는 문제점을 해결함으로써 경제성이 높고 호환성이 있는 4병렬 구조의 IGBT스택을 개발하여 원가를 절감함을 목표로 한다.

2. 단일소자 사용시의 문제점

중대용량 전력변환장치에 단일 IGBT소자를 사용하면 다음과 같은 문제가 있다.

1) 반도체 소자의 총가격이 비싸진다.

IGBT의 용량이 커지면 가격은 그 이상으로 급등한다. 예를 들어, 같은 전압정격의 IGBT에서 800A용량인 소자 1개의 가격은 200A용량인 소자 4개의 가격보다 훨씬 비싸다.

2) 수급기간이 길다.

산업 현장에서 부품의 수급문제는 매우 중요하다. 대용량의 IGBT는 고가품이고 수요가 많지 않아 일반적으로 Stock판매가 아니어서 수급기간이 길어진다. 이를 방지하려면 용량별로 미리 구입하여야 하는데 새로운 소자가 개발되면 기구입한 소자를 사용할 수 없는 등 재고관리면에서 불리하다.

3) 크고 넓은 방열면적이 필요하다.

대용량 반도체소자에서는 열이 집중적으로 발생하며 방열에 충분한 면적의 방열판이 필요하다. 이때, 설치공간에 제한이 있으면 방열면적이 한정되어 방열효과가 저하되기 때문에 시스템의 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 냉각팬의

수 및/또는 용량을 늘려야 하는데, 이는 장치의 가격상승 요인이 된다.

4) 대용량의 써지흡수기가 필요하다.

스위칭소자가 스위칭하면 표유인덕턴스로 인해 스파이크전압이 발생된다. 이때 단일소자를 사용하는 경우와 그보다 소용량의 소자 다수개를 병렬로 사용하는 경우를 비교해 보면 단일소자의 경우에 피크전압이 더 크게 발생하며, 경우에 따라서는 10배 정도 크게 발생하기도 한다. 따라서 대용량 단일소자를 사용하면 써지흡수기가 대용량이어야 하며, 가격과 설치면에서 불리해진다.

5) 주파수 특성이 나쁘다.

반도체 스위칭소자는 용량이 커질수록 주파수특성이 나빠져서 스위칭이 가능한 주파수가 낮아진다. 스위칭주파수가 낮아지면 제어성능이 떨어지고 시스템에 필요한 고조파 필터가 커지며 리액터 및 변압기도 커진다. 따라서 대용량 단일 IGBT소자를 사용하면 주파수특성이 나빠질뿐만 아니라 크기, 무게 및 가격면에서 불리해진다.

3. 4병렬구조 IGBT스택

본 연구에서 개발하고자 하는 IGBT스택은 최종적으로 100kVA 용량의 UPS(무정전 전원장치)에 적용하기 위한 것이다. 이 UPS에 사용되는 인버터는 그림 1과 같은 삼상 전압원 인버터로서 입력전압이 직류 405V이고 출력전압이 교류 170V이며 스위칭주파수가 9kHz이다. 100kVA 용량의 UPS에 단일 IGBT소자를 사용하면 800A 용량의 소자 6개가 필요하지만 본 연구에서는 4병렬구조의 IGBT스택을 개발하므로 200A짜리 IGBT소자 24개가 필요하다.

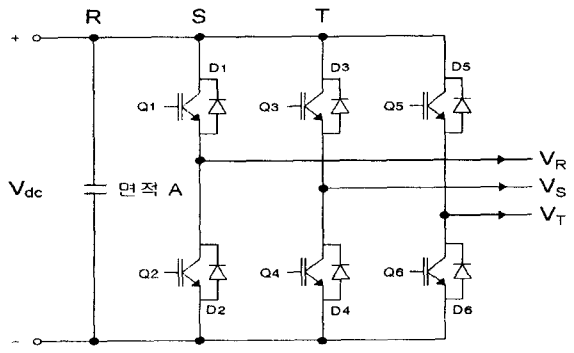

그림 1. 삼상 전압원 인버터

3.1 구동회로

인버터는 3상 VSI(전압원 인버터)이므로 각 암의 상하에 하나씩 총 6개의 구동회로가 필요하다. 4병렬구조의 IGBT스택을 사용하는 경우에도 6개의 구동회로를 사용하며, 한 구동회로의 출력신호는 4병렬 구조의 네 소자에 분할되어 가해진다. 구동회로는 6개이지만 회로의 구성은 동일하다.

구동회로용 전원은 제어전원 강하시 IGBT의 게이트 전원을 차단시켜 IGBT소자를 보호하도록 설계하였다. 또한 IGBT소자와 구동회로는 펄스변압기를 사용하여 절연하였다. 구동회로는 단순한 부품으로 구성되어 있어서 원가절감이 가능하다.

3.2 게이트신호의 분할

여러 개의 소자를 병렬로 접속하면 각 소자 사이의 상호간섭에 의해 게이트 전압이 진동한다. 이러한 현상은 주로 주회로가 턴온하거나 턴오프할 때 발생하는데, 이러한 진동을 최소화하기 위해 그림 2와 같이 IGBT의 각 게이트에 게이트 저항 Rg를 접속하였다.

이 저항은 스위칭시간과 스위칭손실에 커다란 영향을 미친다. Rg값이 너무 작으면 소자의 상승시간과 하강시간이 빠르게 되어 IGBT가 스위칭할 때 di/dt값이 높아져서 써지전압이 높게 발생한다. 따라서 Rg는 스위칭 손실과 써지전압을 고려하여 적절한 값을 선정하여야 한다.

또한 각 소자의 단자 사이에 존재하는 선로 인덕턴스를 최소화하기 위해 구동회로의 출력선을 꼬아서 사용하였으며 가급적 각 소자 사이의 인덕턴스가 같도록 하였다. 이와 같이 하면 주회로가 턴온 또는 턴오프할 때 선로 인덕턴스로 인한 악영향을 피할 수 있다.

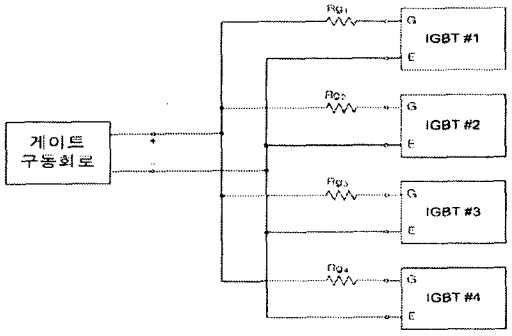

그림 2. 게이트신호의 분할

3.3 소자전류의 균등분배

소자들을 병렬로 접속하여 사용할 때 가장 중요한 문제는 각 소자에 흐르는 전류의 균등분배이다. 이를 위하여 우선적으로 특성이 동일한 소자를 사용하고 접속선의 저항값이 같도록 하며 컴팩트하고 대칭이 되도록 소자를 배치하여야 한다. 각 소자전류를 균등하게 해주기 위해 별도의 부가회로를 설치하는 경우도 있으나 본 연구에서는 실험을 통한

검증을 거쳐 NPT방식의 IGBT를 사용함으로써 문제를 해결하였다.

IGBT소자에는 NPT(Non-Punch Through)방식과 PT(Punch Through)방식이 있다.[1] 두 방식의 소자 모두 Vce-Ic 특성평면에서 고온시의 특성곡선과 저온시의 특성곡선이 교차한다. 이 교차점의 전류값을 초과하는 전류가 IGBT소자에 흐르면 소자의 온도가 고온일수록 소자의 저항값이 증가하며, 교차점 미만의 전류가 흐르면 저항값이 감소한다. 그런데 NPT방식의 소자는 교차점이 일반적인 동작전류보다 낮은 영역에 존재하고 PT방식의 소자는 교차점이 동작전류 이상에 존재한다. 이에 따라 낮은 동작전류가 아닌 영역에서는 NPT방식의 IGBT는 소자의 온도가 증가할수록 소자의 저항이 증가한다.

병렬로 접속되어 있는 소자에서 전류가 균등하게 분배되지 않아 하나의 소자에 과전류가 흐르면 해당 소자의 온도가 증가한다. 이때 NPT방식의 IGBT를 사용하면 온도가 상승한 소자의 콜렉터와 에미터 사이 저항값이 증가한다. 이에 따라 해당 소자에 흐르는 전류가 감소함으로써 각 소자에 전류가 자동적으로 균등하게 분배된다.

3.4 버스바의 설계와 써지 억제

IGBT를 병렬로 배치함에 있어서 도체인 버스바의 설계 및 배치는 매우 중요하다. 우선 가급적 소자를 대칭이 되도록 배치하고 도선부가 짧도록 하였으며 양과 음의 두 버스바를 밀착시켰다.

IGBT는 높은 스위칭 주파수로 동작하는데, 주파수 증대에 따라 전류변화율(di/dt)이 커진다. 이 값이 큰 상태에서 암과 직류커패시터 사이의 단면적(그림 1의 면적 A)이 커지면 루프 인덕턴스가 증가하여 써지가 많이 발생한다.

상기의 폐루프 단면적을 감소시키기 위해 본 연구에서는 가급적 커패시터와 암을 가깝게 배치하였으며 판-버스바를 사용하였다. 또한 (+)버스바와 (-)버스바 사이에 그림 3과 같이 FRP소재의 절연판을 삽입하여 압착시켰다.

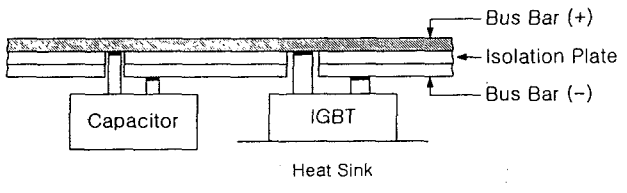

그림 3. 버스바

이상과 같이 버스바를 설계하면 인덕턴스 성분이 감소하여 IGBT의 스위칭시에 발생하는 써지가 대폭 감소한다. 써지전압중 크기는 크지만 에너지량이 적은 것은 1[㎌] 용량의 고주파 커패시터들을 부착하여 추가로 감소시켰다.

4. 경제성 검토

그동안 100kVA UPS에 사용해온 스위칭소자는 EUPEC사(B사)의 FZ 800 R12 KF4[2] 이며, 본 연구에서 개발하고자 하는 IGBT스택에는 이 소자 대신에 SEMIKRON사(A사)의 SKM 200 GB 124 D[3] 네개를 병렬로 접속하여 사용하였다. 두 소자의 스펙은 표 1과 같은데 정격전압과 절연전압이 동일하고 정격전류와 소비전력이 A사 제품이 B사 제품에 비해 1/4임을 알 수 있다. 따라서 전압 및 전류면에서 별도의 부담 없이 대체가 가능하다.

표 1. IGBT의 특성 비교

스위칭소자		A사 제품	B사 제품
최대 정격값	Collector-Emitter Voltage	1,200 [V]	1,200 [V]
	Collector Current	200 [A]	800 [A]
	Total Power Dissipation	1,350 [W]	5,400 [W]
	Insulation Test Voltage	2,500 [V]	2,500 [V]
스위칭 시간 (@125℃)	Turn-on Time	0.125 [㎲]	0.8 [㎲]
	Turn-off Time	0.57 [㎲]	1.15 [㎲]

표 1에서 스위칭시간을 살펴보면 SKM 200 GB 124 D가 FZ 800 R12 KF4에 비해 턴온시간이 1/6.4배이고 턴오프시간은 절반에 불과하다. 따라서 4병렬구조의 IGBT스택을 사용하면 전압 및 전류 정격을 만족할뿐만 아니라 스위칭 특성이 대폭 개선되어 제어의 용이도가 증가하고 시스템에 필요한 고조파 필터, 리액터, 변압기 등을 줄일 수 있다. 이러한 장점은 경제성의 향상과 직결된다.

표 2는 100kVA UPS에 사용되는 인버터 시스템을 대상으로 하여 4병렬구조의 IGBT스택을 사용하는 경우와 단일 IGBT소자를 사용하는 경우의 가격을 비교한 것이다. IGBT스택을 구성함에 있어 200A 용량의 소자가 24개 필요하지만 2개가 내장되어 있는 듀얼팩을 사용하였으므로 듀얼팩의 수는 12개이다. 또한 냉각팬은 단일소자를 사용하는 경우에는 각 암당 하나씩 3개가 필요하지만 4병렬구조의 스택 사용시에는 상위그룹과 하위그룹에 하나씩 2개이면 된다.

표 2에서 IGBT소자의 가격만을 비교하면 42%가 싸지고 인버터 스택 가격 전체를 비교하면 37%가

싸진다. 이렇게 경제성이 높아지는 외에 주파수특성이 개선됨에 따른 부가적인 효과를 생각하면 경제성은 더욱 높아진다.

표 2. 인버터 스택의 가격 비교

구 분		인버터스택에 사용하는 IGBT	
		4병렬구조 스택	단일 IGBT소자
IGBT	규격	SKM200GB124D	FZ800R12KF4
	수량	24개(듀얼팩12개)	6개
	가격	1,260,000원	2,166,000원
구동회로 기판	수량	1개	3개
	가격	158,500원	355,680원
분할저항 기판	수량	3개	불필요
	가격	30,000원	0원
방열판	규격	210Wx500H x75D mm	210Wx500H x75D mm
	면적	210,000s/q	315,000s/q
	수량	2개	3개
	가격	100,000원	150,000원
냉각팬	규격	SKF 16A-230-1	SKF 16A-230-1
	수량	2개	3개
	가격	360,000원	540,000원
써지 흡수기 용량	규격	1μF, 750VAC	1μF, 750VAC
	수량	12개	12개
	가격	120,000원	120,000원
DC 커패시터	규격	8,200μF, 250V	8,200μF, 250V
	수량	10개	12개
	가격	275,000원	330,000원
총 가 격		2,303,500원	3,661,680원

5. 실험 및 개발결과 검토

5.1 실험 및 결과 검토

본 과제에서 개발한 IGBT스택을 100kVA용량의 UPS에 장착하여 실험하였다. 그림 4는 본 영구에서 개발한 4병렬구조의 IGBT스택으로서 중앙부에서 우측으로 배열되어 있는 것들이 인버터의 세 암이며, 왼편의 둥근 것이 인버터에서 상위그룹과 하위그룹에 하나씩 설치한 냉각팬이다.

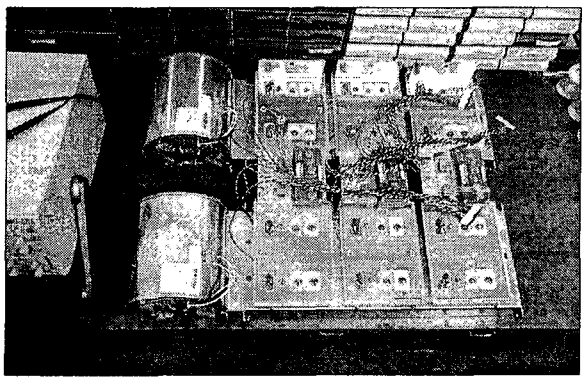

그림 4. 개발한 4병렬구조 IGBT스택 시제품

먼저 구동회로에서 출력된 게이트신호가 4개의 IGBT에 제대로 인가되는지를 점검하였다. 그림 5는 4병렬로 접속되어 있는 IGBT에 인가되는 게이트전압 파형으로서 네 파형이 동일함을 알 수 있다. 또한 UPS의 삼상출력을 대칭으로 만들기 위한 게이트신호 파형을 점검하였다. 그림 6은 R상, S상 및 T상의 세 암에 인가되는 게이트신호 파형으로서 파형의 형태가 동일하고 120° 씩 위상차가 남을 확인할 수 있다.

다음에는 개발한 IGBT스택을 100kVA용량의 UPS에 장착하여 시험하였다. 이때의 부하량은 유효전력이 34.7kW, 무효전력이 23.6kvar로서 피상전력이 43.1kVA이다. 실험파형에서 시간축은 60Hz 기준이므로 별도로 표기하지 않았다.

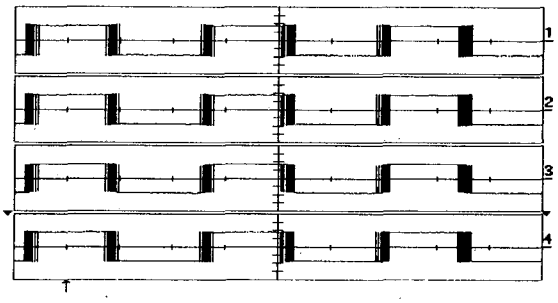

그림 5. 4병렬 접속 IGBT에 가해지는 게이트신호

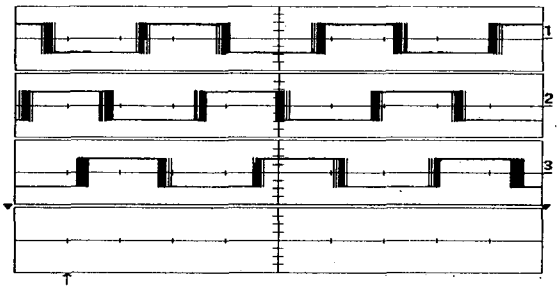

그림 6. 대칭 3상 출력을 위한 게이트신호

그림 7은 UPS의 입력전압과 출력전압의 파형이다. 현재 공장지대를 포함한 수용가측에서 공급받는 교류전압은 그림 7의 상단에 있는 파형처럼 품질에 문제가 있으나 UPS를 사용하면 하단 파형처럼 보다더 정현파에 가까워진다. 그림 7에서 입력전압은 R상과 S상 사이의 선간전압 파형이며 출력전압은 T상과 S상 사이의 선간전압 파형이어서 출력전압의 위상이 입력전압의 위상보다 60° 만큼 앞선다.

UPS는 전력의 품질 개선을 위해 사용되기도 하지만 전원에 이상이 발생했을 때에도 부하에 전력을 계속 공급하기 위한 용도로 주로 사용된다. 그림 8은 UPS의 입력전원을 인위적으로 차단하였다

가 다시 인가하면서 외부전원에 이상이 발생했을 때에도 부하에 전력이 무순단으로 공급되는지와 외부전원 복구시에 무리 없이 동기화되어 재투입되는지를 시험한 결과로서, 전원 복구시에 바로 정상적인 동작으로 복귀됨을 확인할 수 있다.

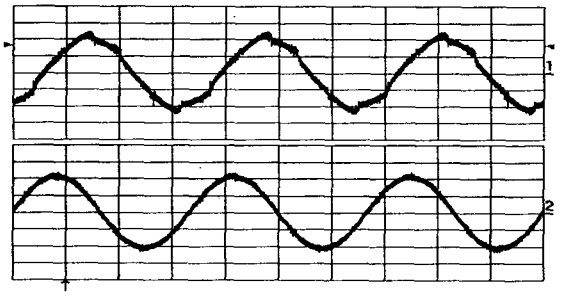

그림 7. UPS의 입력전압(상)과 출력전압(하)

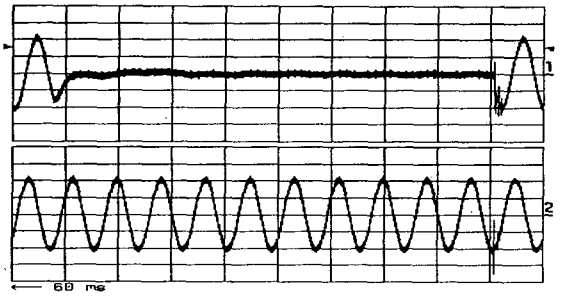

그림 8. 정전시의 입력전압(상)과 출력전압(하)

이상으로부터 본 연구에서 개발한 4병렬구조 IGBT스택에서 게이트신호가 제대로 분할되고 3상 출력을 내는데 적합하며 개발결과를 적용한 UPS가 적절하게 동작함을 알 수 있다.

5.2 개발결과의 기대효과

4병렬구조 IGBT스택을 개발함으로써 기대할 수 있는 효과는 다음과 같다.

1) 한두 종류의 중소용량 스위칭소자만 있으면 되므로 소자의 구입이 쉽고 재고관리가 용이해지며 수급기간이 짧아진다.

2) 낮은 용량의 소자를 사용함에 따라 주파수특성이 향상되고 써지흡수기의 용량이 작아진다.

3) 소자를 여러 개 사용하므로 방열 표면적이 증가하여 안정성이 높아진다.

4) 인버터의 용량에 따라 병렬로 접속되는 반도체소자의 숫자만 달라지므로 호환성이 있다.

5) 인버터 자체를 모듈화할 수 있으므로 유지보수가 용이해진다.

6) 전력변환장치의 성능이 향상됨에 따라 제어가 용이해지고 부가가치가 높은 제품을 생산할 수 있다.

7) 원가가 절감되므로 경쟁력을 높이고 보급을 확대할 수 있다.

8) 경제성과 경쟁력이 높아져서 수출이 가능해지고 수입대체효과가 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 중대용량 전력변환장치에서 스위칭소자로 단일 IGBT를 사용하는 대신에 보다 낮은 용량의 IGBT 4개를 병렬로 사용하여 주파수특성이 개선되고 경제성이 높으며 호환성이 있는 4병렬구조의 IGBT스택을 개발하였다.

IGBT스택을 사용하면 단일소자를 사용할 때의 여러 단점이 개선되지만 병렬구조를 사용함에 따른 새로운 문제가 대두된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 4병렬구조에 적합한 효율적인 구동회로를 개발하고 게이트신호의 분할, 소자전류의 균등분배에 관한 문제를 해결하였으며 버스바를 적절하게 설계하여 써지를 억제하였다.

경제적인 면에서 부품 가격을 40%이상, 시스템 가격을 35%이상 절감할 수 있음을 확인하였다. 여기에 주파수특성의 향상에 따른 부가적인 효과를 감안하면 4병렬구조의 IGBT스택은 매우 경제적이다. 또한 모듈화를 함으로써 시스템의 유지보수가 용이해진다.

개발후에는 100kVA 용량의 무정전 전원장치에 사용되는 인버터에 적용하여 실험하였다. 4병렬구조의 IGBT스택과 이를 적용한 UPS의 성능을 실험한 결과, 만족스러운 결과를 얻음으로써 본 연구에서 개발한 IGBT스택의 유용성을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins, Power Electronics, John Wiley & Sons, Inc., 1995.

[2] EUPEC, Data Book, 2003.

[3] SEMIKRON, Data Book, 2003.