

RF Generator

최상돈

((주) 뉴파워 플라즈마 연구소장)

1. 서 론

사회가 점차 정보화되고 기능화됨에 따라 이의 근간이 되는 반도체의 수요는 지난 수십년 만에 메모리이든 비메모리이든 간에 전체 산업에 고르게 확산되고, 비약적으로 증대되었으며 앞으로도 그러할 것이다.

이러한 반도체를 생산하기 위해서는 반도체 셀을 만들고 회로를 넣는 웨이퍼의 가공공정이 필수인데, 각 반도체 제조회사마다 칩의 고집적화, 수율의 향상 등을 위해 끊임없이 노력을 기울이고 있고 이는 벌써 세계적인 수준에 와있다.

웨이퍼 가공공정에서의 플라즈마의 생성은 거의 필수조건이며, 플라즈마 생성을 위해 투입되는 주에너지원인 전기를 공급하는 전원장치도 그러한 추세에 걸맞게 한층 다양해지고 있으며 고도의 신뢰성을 갖추면서도 여러기능을 추가하기 위해 새로운 기술들이 구사되고 있다.

2. 개발환경

전력전자와 고주파 관련기술이 집약된 전원장치는 고부가가치 상품에는 틀림없으나, 이는 상당한 기술적인 축척과 끊임없는 노력, 또 개발을 위한 많은 금전적 투자의 산물이며, 이는 결코 간단히 해결될 것들이 아니어서 우리나라의 경우 잘 알려져 있지 않았으며, 기술개발의 활성화가 이루어지지 않아 개발 인력 또한 흔치 않은 실정이다.

그러므로 이러한 전원장치들은 아쉽게도 거의 대부분이 수입에 의존하고 있고 그냥 방치할 경우 기술적인 예측은 더욱 심화될 것이다.

이런 분야의 기술개발이 비교적 뒤쳐진 우리나라의 현실로는 몇몇 선진외국의 기술을 단순히 따라가기에는 쉽지 않은 것이 현실이나 기술과 경험을 결집하고 실효성 있는 연구개발에 정진한다면 여타분야와 마찬가지로 결코 넘지 못할 산은 아니라고 생각한다.

3. 플라즈마 Generator의 사용환경

플라즈마용 Generator의 부하(Load)로는 크게 2가지 type으로 나뉜다.

- 첫째는 Capacitive Coupled Plasma(CCP)용이며 이는 Capacitive Load이며
- 둘째는 Inductive Coupled Plasma(ICP)용이며 Inductive Load이다.

일반적으로 상용교류전원에서는 공급이 무한정에 가깝고 가정용 부하는 소비자가 마음대로 선택하여 쓸 수 있으나 공장과 같이 대전력을 소비하는 곳에서는 공급자인 한국전력의 간섭이 시작된다. 이유는 잘 알다시피 효율적인 전원 공급 및 소비를 위해 전류를 전압위상과 일치시켜야 하기 때문이다.

이는 교류에서 부하의 임피던스에 포함된 리액턴스 성분에 대한 보상이 필요함을 의미하며 주파수가 높아질수록 작은 리액턴스에 의해서도 큰 영향이 나타나므로 심각해질 수 밖에 없다.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_c} \quad X_L = 2\pi f_L$$

- 플라즈마용 Generator는 이러한 조건과 같이 공급된 전력과 부하간의 1:1의 대응이 필요하다. 물론 RF와 같이 주파수가 높아 부하 리액턴스에 민감한 경우는 예외없이 matcher를 사용하여 임피던스를 잘 정합하므로 이런 문제는 다소 양호한 편이나 플라즈마를 이그니션하기 위한 과정에서는 잠시나마 UN Matching 상태가 되어 이에 대한 배려가 필요하며 LF와 같이 주파수가 낮을 경우에는 리액턴스 성분에 대한 보상이 없이 그냥 사용하는 경우도 있어 Bridge Type 회로를 사용하여 회로를 구성한 경우 Mode Change에 따르는 심각한 손상을 입게 될 수 있고 그런 경우가 아니더라도 공급될 전력이 충분히 부하로 진행하지 못하므로 규정된 power를 공급하기 위해 Generator도 Full Power때보다 더 큰 손실을 입게 되기 때문이다.

4. 플라즈마 Generator의 종류

1) 플라즈마 생성용 전원장치는 직류 또는 교류 출력형이 있으며, 그 중에 교류를 출력하는 Generator를 주파수 별로 분류하면 표 1과 같다.

2) 비교적 낮은 주파수인 LF Generator는 초기에 주로 아날로그 전력증폭회로를 사용하여 회로를 구성하였으나 저효율, 고중량, 고비용 등으로 인해 점차 스위칭 형태로 변화되었으며 현재는 그러한 제품들이 다수를 차지하고 있다.

고주파를 사용하는 RF Generator는 소재의 제약 등으로 인해 저주파에서와 같이 완벽한 스위칭 형태로의 진행은 되어있지 않지만 소형화, 고효율, 저비용 등을 위해 점차 방식 및 회로가 바뀌고 있는 시점이다.

주파수 대역별 각 메이커의 Generator별 내부사항 비교표는 표 2와 같다.

5. Generator 설계를 위한 조건

5.1 임피던스 부정합에 대한 보호

Generator 종단 측면 측에 설치된 방향성 결합기(Directional Coupler)는 진행파(Forward power)와 반사파(Reflect Power)에 대한 값이 인출되며 정상상태로 작동되는 경우 진행파에 대한 센싱값을 사용자에게 의해 선택된 기준값의 비교 제어하므로 항상 일정한 출력을 내게 되어 있다.

부하와의 임피던스(R.L.C)가 부정합할 때 반사파가 발생하며 센서에 의해 검출되고 제조자에 의해 고정된 기본 값과 비교, 이보다 큰 경우에는 system을 보호하기 위해 RF Power를 낮추게 된다.

통상 Full Power 대비 약 20%정도의 값에서 Limit 기본값이 설정되며, 이보다 더 큰 값을 허용하려면 RF Power Amp의 Margin을 더 키워 Power Dissipation 허용치를 올려야 한다.

5.2 온도에 대한 보호

Generator가 동작시에는 내부 손실은 필연적이며 이에 대한 방열이 필요하다. 가장 효과가 큰 것은 수냉식이지만 냉각수를 항상 공급해야 하는 불편함이 있어 Power가 크지 않거나 손실이 적을 경우 공냉식으로 하는 경우도 있다.

그러나 수냉식이라도 발열 부품들이 모두 방열판에 수용되는 것은 아닐 경우 공냉식과 혼용하는 경우도 많이 있다. 냉각수의 온도는 대개 18 정도로 공급이 되나 System이 과열되거나 냉각수 흐름에 문제가 생길 경우를 대비하여 방열판의 온도가 대략 35 를 초과할 경우를 대비 protection을 설치한다. 장비가 24시간 가동되는 상태에서 성능이 유지되어야 하며, 내부 센서들의 값이 정확히 유지되기 위해서라도 system 실내온도의 관리는 철저해야 하며, 이는 회로이외의 부분이라서 "적당히 처리하면 되겠다"라고 생각했다면 시스템 개발은 영원히 끝나지 않을 수도 있다.

여건상 주어진 공간은 FAN을 하나 추가하기에도 어려울 경우가 많으므로 많은 주의가 필요하다.

5.3 센서 설계

표 1. 주파수별 GENERATOR의 분류

| | 주파수별 | 주파수조정 | 용도 | 출력용량 |
|-----------------|-----------------|-------|-----------------|-----------|
| RF GENERATOR | 1.7MHz ~ 2.2MHz | 가변형 | 반도체 공정용 | 2kW~5kW |
| | 13.56MHz | 고정 | 반도체 공정용 및 응용분야 | 600W~10kW |
| | 27.12MHz | 고정 | 공정용 | 1~5kW |
| | 60MHz | 고정 | 공정용 | 1~2kW |
| LF GENERATOR | 80~450KHz | 가변 | 공정용 | 1.5kW |
| | 100KHz | 고정 | 공정 및 플라즈마 응용 분야 | 1kW~5kW |
| | 400KHz | 고정 | 공정용 | 1kW~5kW |

표 2. Generator별 내부사양비교

| 구 분 | 주파수별 | 회로방식별 | | | 냉각 방식 | 특징 | Maker | |
|--------------|--------------|---------------------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|
| | | 내부전원 공급 | Power AMP 방식 | 제어방식 | | | | |
| RF Generator | 1.7~2.3MHz | AC 208V 직접전류 | half or full Bridge | PWM 제어 | 수냉, 공냉 혼용 | · 주파수가별 전류위상제어 · 고효율 | ENI AE | |
| | 13.56MHz | · Transformer사용 · 정류형 | Near 방식 | DBM사용 입력제어 | 혼용 | · ENI 및 기타회사 · 전통적 방식 · 저효율 | ENI | |
| | | SMPS | Linear 방식 | DBM사용 입력제어 | 혼용 | · 전통적 방식에서 DC공급원만 개선 | ENI | |
| | | SMPS | · Linear 방식 · 공진형 | DC 공급 전압조절 | 수냉 | · 부피최소화 · 고효율 | AE | |
| | 29.12MHz | · Transformer사용 · 전류형 | Linear 방식 | DBM사용 입력제어 | 혼용 | · 전통방식 · 저효율 | ENI | |
| | | · SMPS 사용 | · Linear 방식 · 공진형 | DBM사용 입력제어 | 혼용 | · 저효율 | ENS | |
| | 60MHz | · Transformer 사용 · 전류형 | · Linear 방식 · 공진형 | DBM사용 입력제어 | 혼용 | · 저효율 | ENS | |
| | | SMPS사용 | · Linear 방식 · 공진형 | DC전압조절 | 수냉 | · 고효율 | AE | |
| | LF Generator | 80~450kHz | AC 117V 직접 정류 | Linear 방식 | Multiplayer 사용입력조절 | 공냉 | 저효율 | ENS |
| | | 100kHz | AC 208V 직접전류 | Linear방식 | Multiplayer 사용입력조절 | 공냉 | 고효율 | NPP AE |
| 400kHz | | AC208V 직접전류 | Half or Fall Bridge | PWM제어 | 공냉 | 고효율 | NPP AE | |

Generator는 항상 손실을 동반하고 이는 곧 열로 나타나므로 센서가 열에 민감해서는 안된다. 특히 열변화에 대하여 배려하여야 하는데 어쩔 수 없이 변화가 있는 부품을 사용할 경우는 이에 대한 보상이 필요하다.

정류형 센서를 사용한 경우 그 값이 크지 않을 때 정류소자에 걸리는 전압만큼의 Drop이 생겨 오차가 발생한다. 그 값을 감안하여 미리 Bias를 걸어주든지 출력값을 프로그램에 set하고 정해진 값이 convert되어 출력하든지 하는 배려가 있

어야 0.1%정도의 오차율이 달성될 수 있다. Bias를 걸어준 경우에는 정류소자의 민감한 열변화에 따른 온도보상도 같이 필요하다.

오차허용폭이 클 경우는 예외도 있다.

5.4 Feedback Loop

제어되어 출력하는 것이 노이즈 성분을 다분히 갖고 있는 고주파이므로 Feedback Loop가 노이즈에 대한 내성을 충분

히 가져야 하는데 안정도와 resolution은 서로 상반된 관계가 성립되므로 신중을 기해야 한다. 또한 Loop의 Speed는 시스템의 보호를 위해서도 중요하며, 오차증폭기와 전체 반응속도의 불일치로 Shoot가 발생한 경우 부하에도 큰 손상을 줄 수 있다.

가장 중요한 사항이면서도 계산된 값의 범위가 광범위해서 실측치와 오차가 큰 부분이기도 하다.

5.5 Power Amp Stage

5.5.1 RF Amp

각 사의 사양이 다른 모습을 가지고 있다. 그러나 Application 상의 차이일 뿐 근본적으로는 광대역형 또는 공진형으로 구분되며 사용될 부품 및 Power Range에 따라 환경에 맞춰 적합하게 구성된다.

주파수가 높고 내부 임피던스의 변화가 크므로 전류 또는 전압에 따라 적합한 부품을 선택하기 위해서는 설계시 Rule이 필요하다.

예를 들면 낮은 임피던스에서는 많은 전류가 흐르므로 사용할 Capacitor의 전류용량이 충분해야 하며 실장시 방열에도 충분히 배려해야 하고 Generator가 무부하시 작동할 경우는 출력전압이 2배까지 상승하므로 부품의 내압도 충분한 여유를 두어야 한다.

5.5.2 LF Amp

종래에는 Linear Type이 주종이었으나, 접차 Switch Type으로 전환되었다. 그러나 부하 정합시와 부정합시의 손실률의 차이로 해서 부정합을 어느 정도 허용해야 하는 경우는 Linear Type의 손실과 그 차이가 좁혀져 저손실만을 생각하고 허용손실의 여유없이 설계할 경우 그 결과는 또 한번의 실패로 이어질 수 있다.

특히, 부하의 리액턴스 변화분에서 인덕턴스가 개입된 경우 Duty loss가 커지게 되며 Capacitor가 개입된 경우 전류의 위상이 전압보다 앞서는 상황이 되면 상황은 더욱 심각하다.

이런 경우를 대비 미리 적당한 인덕터를 직렬삽입하여 여유를 두는 것이 해결방법의 하나가 될 수 있으나 항상 추가 손실을 동반하고 있다는 점에서 그리 유쾌하지는 않다.

또 Switch에 흐르는 회생전류를 막기 위해 직렬 다이오드를 삽입하고 외부에 회생다이오드를 설치하는 방법으로 커버할 수 있으나 회로가 복잡해지고 구성부품이 많아져 Bridge type 본래의 모습에서 많이 달라지게 된다.


6. Generator의 개발전망

- 회로 및 소재기술의 발달로 중량과 부피가 많이 줄어들고 전원효율도 많이 향상 되었으나 일부 Generator의 경우 너무

부피만을 의식 줄여서는 안 될 부품까지 무리하게 축소하여 전체의 내성이 떨어지는 부작용도 일부 목격된다.

- RF Amp의 경우 근본적인 회로기술은 이미 나와 있으나 소재의 개발에 따른 변화가 있을 것으로 예견되며

- LF Amp의 경우는 아직도 미진한 부분이 여러 곳에서 나타나고 있어 개선을 위한 여지가 많으므로 활발한 연구가 필요하다 하겠다.

- 또 이러한 개선이 일어날 경우 꼭 Generator가 아니더라도 다른 용도로의 응용도 가능하다 할 것이다. 

〈 저 자 소개 〉



최상돈

1978년 철도고등학교 졸업, 1977년 ~ 2000년
철도청 RF분야 근무, 2000년 ~ 현재 (주)뉴파
워 플라즈마 연구소장.