



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2013-0139377  
(43) 공개일자 2013년12월20일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
*H03H 7/40* (2006.01)

(21) 출원번호 10-2013-7031679(분할)

(22) 출원일자(국제) 2006년10월31일  
심사청구일자 없음

(62) 원출원 특허 10-2008-7010467  
원출원일자(국제) 2006년10월31일  
심사청구일자 2011년06월20일

(85) 번역문제출일자 2013년11월28일

(86) 국제출원번호 PCT/US2006/042360

(87) 국제공개번호 WO 2007/053569  
국제공개일자 2007년05월10일

(30) 우선권주장  
60/731,797 2005년10월31일 미국(US)

(71) 출원인  
엠케이에스 인스트루먼츠, 인코포레이티드  
미국, 매사추세츠 01810, 앤도버, 스위트 201, 테크 드라이브 2

(72) 발명자  
나가카타, 시드하쓰, 피.  
미국, 메사추세츠 01720, 액톤, 에이피티. 비2,  
데이비스 로드 23

키시네브스키, 마이클  
미국, 메사추세츠 01845, 노스 앤도버, 에버그린  
드라이브 8  
(뒷면에 계속)

(74) 대리인  
신영무

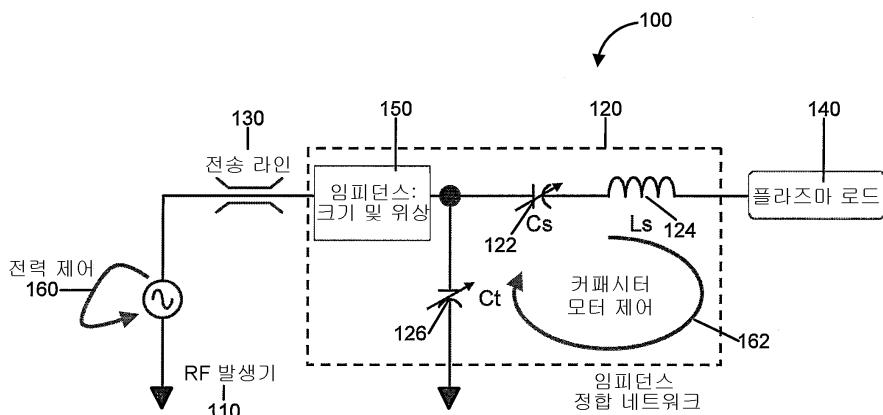
전체 청구항 수 : 총 31 항

#### (54) 발명의 명칭 고주파 전력 전달 시스템

(57) 요약

동적 로드(260)에 전력을 전달하는 시스템(200) 및 방법을 제공한다. 이 시스템은, 대략 일정한 전력 개루프 응답을 갖는 DC 전력을 제공하는 전원(210)과, DC 전력을 RF 전력으로 변환하는 전력 증폭기(220)와, RF 전력에 관련된, 전압, 전류, 전압 벡터와 전류 벡터 간의 위상각을 측정하는 센서(240)와, 전력 증폭기의 임피던스를 수정하여 동적 로드(260)의 임피던스와 적어도 대략적으로 정합시키는 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템(250, 252)과, 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템(200)을 제어하는 컨트롤러(230)를 포함한다. 이 시스템(200)은, 전력 증폭기에 의해 전달되는 전력을 결정하는 센서 미세조정 측정 모듈과, 동적 로드(260)에 전달되는 전력을 결정하는 전자 정합 시스템 미세조정 모듈(252)과, 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템에서 소모되는 전력을 계산하는 전력 소모 모듈을 더 포함한다.

## 대표도 - 도1a



(72) 발명자

사지, 알리

미국, 메사추세츠 02493, 웨스톤, 보스톤 포스트  
로드 165

칼바이티스, 티모시, 이.

미국, 미시간 48152, 리보니아, 사우스эм프顿 드라  
이브 19990

맥키니, 월리암, 에스.

미국, 메사추세츠 02139, 캠브리지, 에이피티. 2,  
울스톤 스트리트 59

굿맨, 다니엘

미국, 메사추세츠 02421, 렉싱تون, 브릭스 로드 1

---

홀버, 월리암, 엠.

미국, 메사추세츠 01890, 원체스터, 쳐지 스트리트  
126

스미스, 존, 에이.

미국, 메사추세츠 01845, 노스 앤도버, 키이스 웨  
이 10

바이스트릭, 일리야

미국, 메사추세츠 01970, 살럼, 브리타니아 서클  
39

## 특허청구의 범위

### 청구항 1

동적 로드에 전력을 전달하는 시스템으로서,  
 일정한 전력 개루프 응답을 갖는 DC 전력을 제공하는 전원;  
 상기 DC 전력을 RF 전력으로 변환하는 전력 증폭기 — 상기 전력 증폭기는 주파수 설정점을 가짐 — ;  
 상기 RF 전력에 관련된, 전압, 전류, 전압 벡터와 전류 벡터 간의 위상각을 측정하는 센서;  
 상기 전력 증폭기의 임피던스를 수정하여 동적 로드의 임피던스와 정합시키는 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템; 및  
 컨트롤러를 포함하고,  
 상기 컨트롤러는:

상기 동적 로드와 상기 전력 증폭기 사이에 측정되는 컨덕턴스 값과 컨덕턴스 설정점과의 비교에 기초하여 상기 전력 증폭기의 상기 주파수 설정점을 제어하는 주파수 제어 루프, 및

상기 전력 증폭기의 상기 임피던스가 변화할 때 상기 동적 로드와 상기 전력 증폭기 사이에서 서셉턴스 만이 변화하도록 상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템을 제어하는 임피던스 제어 루프를 포함하는,  
 전력 전달 시스템.

### 청구항 2

제 1 항에 있어서,  
 상기 컨트롤러는 상기 전력 증폭기 및 상기 동적 로드 간의 임피던스에 관련된 컨덕턴스 및 서셉턴스의 동시 제어를 위해 상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템을 제어하는 전력 전달 시스템.

### 청구항 3

제 1 항에 있어서,  
 상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템은, 인덕터와, 상기 인덕터에 직렬로 연결된 커패시터와, 상기 동적 로드에 병렬로 연결된 다수의 스위칭(switched) 커패시터를 포함하는 전력 전달 시스템.

### 청구항 4

제 3 항에 있어서,  
 상기 인덕터는 멀티탭형 인덕터 또는 가변형 인덕터인 전력 전달 시스템.

### 청구항 5

제 3 항에 있어서,  
 상기 다수의 스위칭 커패시터의 각각은 스위치 및 추가 커패시터에 직렬로 연결된 전력 전달 시스템.

### 청구항 6

제 1 항에 있어서,  
 상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템은, 커패시터와, 상기 동적 로드에 병렬로 연결된 다수의 스위칭 커패시터를 포함하고, 상기 다수의 스위칭 커패시터의 각각은 스위치 및 추가 커패시터에 직렬로 연결된 전력 전달 시스템.

### 청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 컨트롤러는 RF 전력 주파수, RF 전력 크기, 상기 전력 증폭기 및 상기 동적 로드 간의 임피던스를 동시에 제어하는 전력 전달 시스템.

### 청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템은 상기 전력 증폭기 및 상기 동적 로드 간에 정합되는 임피던스의 주파수를 제어하는 전력 전달 시스템.

### 청구항 9

제 1 항에 있어서,

상기 컨트롤러는, 컨덕턴스 및 서셉턴스를 불안정한 동적 로드를 안정화시키는 설정점으로 조정하도록 상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템을 제어하는 전력 전달 시스템.

### 청구항 10

제 1 항에 있어서,

상기 전력 증폭기에 의해 전달되는 전력을 결정하는 센서 미세조정(sensor calibration) 측정 모듈;

동적 로드에 전달되는 전력을 결정하는 전자 정합 시스템 미세조정 모듈; 및

상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템에서 소모되는 전력을 계산하는 전력 소모 모듈

을 더 포함하는 전력 전달 시스템.

### 청구항 11

제 10 항에 있어서,

상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템에서 소모되는 전력은, 상기 전력 증폭기에 의해 전달되는 전력 및 상기 동적 로드에 전달되는 전력 간의 차인 전력 전달 시스템.

### 청구항 12

제 10 항에 있어서,

상기 센서 미세조정 측정 모듈은 상기 센서를 저항성 로드 내로 미세조정하는 전력 전달 시스템.

### 청구항 13

제 12 항에 있어서,

상기 저항성 로드는 50Ω인 전력 전달 시스템.

### 청구항 14

제 10 항에 있어서 ,

상기 전자 정합 시스템 미세조정 모듈은, 상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템의 출력을 로드 시뮬레이터 내로 미세조정하는 전력 전달 시스템.

### 청구항 15

제 14 항에 있어서,

상기 로드 시뮬레이터는 역(inverse) 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템인 전력 전달 시스템.

### 청구항 16

제 10 항에 있어서,

상기 전자 정합 시스템 미세조정 모듈은,

저항성 로드에 전달되는 전력을 결정하는 전력 측정기 미세조정 모듈과,

로드 시뮬레이터 내부에서 소모되는 전력을 결정하는 로드 시뮬레이터 미세조정 모듈을 포함하는 전력 전달 시스템.

### 청구항 17

제 15 항에 있어서,

상기 센서 미세조정 측정 모듈은 상기 센서를 저항성 로드 내로 미세조정하고, 상기 저항성 로드는 50Ω인 전력 전달 시스템.

### 청구항 18

제 15 항에 있어서,

상기 동적 로드에 전달되는 전력은, 저항성 로드에 전달되는 전력 및 상기 로드 시뮬레이터 내부에서 소모되는 전력의 합인 전력 전달 시스템.

### 청구항 19

동적 로드에 전력을 전달하는 방법으로서,

일정한 전력 개루프 응답을 갖는 DC 전력을 제공하는 단계;

상기 DC 전력을 전력 증폭기를 통해 RF 전력으로 변환하는 단계 – 상기 전력 증폭기는 주파수 설정점을 가짐 – ;

상기 RF 전력에 관련된, 전압, 전류, 전압 벡터와 전류 벡터 간의 위상각을 센서를 통해 측정하는 단계;

동적 로드의 임피던스를 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템과 정합시키기 위해 상기 전력 증폭기의 임피던스가 변화할 때 상기 동적 로드와 상기 전력 증폭기 사이에서 서셉턴스만이 변화하도록 상기 전력 증폭기의 임피던스를 수정하는 단계; 및

상기 동적 로드와 상기 전력 증폭기 사이에 측정되는 컨덕턴스 값과 컨덕턴스 설정점과의 비교에 기초하여 상기 전력 증폭기의 상기 주파수 설정점을 제어하는 단계

를 포함하는 전력 전달 방법.

### 청구항 20

제 19 항에 있어서,

상기 전력 증폭기 및 상기 동적 로드 간의 임피던스에 관련된 컨덕턴스 및 서셉턴스를 동시에 제어하는 단계를 더 포함하는 전력 전달 방법.

### 청구항 21

제 19 항에 있어서,

RF 전력 주파수, RF 전력 크기, 상기 전력 증폭기 및 상기 동적 로드 간의 임피던스를 동시에 제어하는 단계를 더 포함하는 전력 전달 방법

### 청구항 22

제 19 항에 있어서,

상기 전력 증폭기 및 상기 동적 로드 간에 정합되는 임피던스의 주파수를 제어하는 단계를 더 포함하는 전력 전달 방법.

### 청구항 23

제 19 항에 있어서,

컨덕턴스 및 서셉턴스를 불안정한 동적 로드를 안정화시키는 설정점으로 조정하도록 상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템을 제어하는 단계를 더 포함하는 전력 전달 방법.

### 청구항 24

제 19 항에 있어서,

상기 전력 증폭기에 의해 전달되는 RF 전력을 결정하는 단계;

동적 로드에 전달되는 전력을 결정하는 단계; 및

상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템에서 소모되는 전력을 계산하는 단계

를 더 포함하는 전력 전달 방법.

### 청구항 25

제 24 항에 있어서,

상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템에서 소모되는 전력은, 상기 전력 증폭기에 의해 전달되는 전력 및 상기 동적 로드에 전달되는 전력 간의 차인 전력 전달 방법.

### 청구항 26

제 24 항에 있어서,

상기 동적 로드에 전달되는 전력을 결정하는 단계는,

저항성 로드에 전달되는 전력을 결정하는 단계; 및

로드 시뮬레이터 내부에서 소모되는 전력을 결정하는 단계

를 포함하는 전력 전달 방법.

### 청구항 27

제 26 항에 있어서,

상기 동적 로드에 전달되는 전력은, 저항성 로드에 전달되는 전력 및 상기 로드 시뮬레이터 내부에서 소모되는 전력의 합인 전력 전달 방법.

### 청구항 28

제 19 항에 있어서,

상기 센서를 저항성 로드 내로 미세조정하는 단계를 더 포함하는 전력 전달 방법 .

### 청구항 29

제 19 항에 있어서,

상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템의 출력을 로드 시뮬레이터 내로 미세조정하는 단계를 더 포함하는 전력 전달 방법.

### 청구항 30

동적 로드에 전력을 전달하는 장치로서,

일정한 전력 개루프 응답을 갖는 DC 전력을 제공하는 수단;

상기 DC 전력을 전력 증폭기를 통해 RF 전력으로 변환하는 수단 – 상기 전력 증폭기는 주파수 설정점을 가짐

— ;

상기 RF 전력에 관련된, 전압, 전류, 전압 벡터와 전류 벡터 간의 위상각을 센서를 통해 측정하는 수단;

동적 로드의 임피던스를 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템과 정합시키기 위해 상기 전력 증폭기의 임피던스를 수정하는 수단;

상기 동적 로드와 상기 전력 증폭기 사이에 측정되는 컨덕턴스 값과 컨덕턴스 설정점과의 비교에 기초하여 상기 전력 증폭기의 상기 주파수 설정점을 제어하는 수단; 및

상기 전력 증폭기의 상기 임피던스가 변화할 때 상기 동적 로드와 상기 전력 증폭기 사이에서 서셉턴스만이 변화하도록 상기 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템을 제어하는 수단

을 포함하는 전력 전달 장치.

### 청구항 31

제 30 항에 있어서,

상기 전력 증폭기에 의해 전달되는 전력을 결정하는 수단;

동적 로드에 전달되는 전력을 결정하는 수단; 및

전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템에서 소모되는 전력을 계산하는 수단

을 더 포함하는 전력 전달 장치.

## 명세서

### 기술 분야

[0001]

본 발명은 전력 전달 시스템에 관한 것으로, 보다 구체적으로는 동적 로드에 전력을 전달하기 위한 시스템에 관한 것이다.

### 배경 기술

[0002]

동적 로드(load)에 RF 전력을 제공하는 다양한 방식들이 존재한다. RF 발생기는 통상적으로 약 400kHz 내지 약 200MHz 사이의 주파수에서 동적 로드에 전력을 제공한다. 일부 과학 응용 분야, 산업 응용 분야, 의학 응용 분야에서 사용되는 주파수들은 약 2MHz, 13.56MHz, 및 27MHz이다.

[0003]

도 1a에 도시한 바와 같이, RF 전력을 동적 로드(즉, 플라즈마 로드(140))에 제공하기 위한 시스템(100)은 50Ω 전송 라인(130)에 의해 연결된 고정 주파수 RF 발생기(110) 및 2축 투닝가능 정합 네트워크(120)를 포함한다. 투닝가능 정합 네트워크(120)는, 직권 전동형(series motorized) 진공 가변 커패시터(122), 인덕터(124), 및 분권 전동형(shunt motorized) 진공 가변 커패시터(126)를 포함한다. 직렬 커패시턴스 및 센트 커패시턴스를 결정하는데 사용되는 알고리즘은 통상적으로 크기 및 위상 검출기(150)를 이용하여 행해지는 임피던스 측정에 기초한다. 독립적 전력 제어는 RF 발생기(110)에서의 전력 측정에 기초한다. 전력 제어 루프(160) 및 임피던스 제어 루프(162)는 독립적이다.

[0004]

도 1b에 도시한 바와 같이, RF 전력을 동적 로드에 제공하는 다른 시스템(100')은, RF 발생기(110)에 의해 공급을 받으며 50Ω 전송 라인(130)에 연결된 고정 소자 정합 네트워크(120')를 포함한다. 고정 소자 정합 네트워크(120')는 직렬 커패시터(122), 인덕터(124), 센트 커패시터(126)를 포함한다. RF 발생기(110)의 주파수는 소정의 범위(예를 들어, 13.56MHz±5%)로 투닝될 수 있다. RF 발생기(110) 주파수 커맨드는 전압 정재파비(VSWR)의 값에 기초한다. 독립적 전력 루프 및 VSWR (임피던스) 제어 루프(160')는 RF 발생기(110)의 출력에서의 측정에 기초한다.

[0005]

도 1c에 도시한 바와 같이, RF 전력을 동적 로드에 제공하는 또 다른 시스템(100'')은 집적된 RF 발생기-임피던스 정합 네트워크(120'')를 포함한다. RF 발생기-임피던스 정합 네트워크(120'')는 직렬 커패시터(122), 인덕터(124), 다수의 센트 커패시터(126a 내지 126n)를 포함한다. 이 센트 커패시터(126a 내지 126n)들은 커패시터(126)들을 그라운드에 결합 및 결합 해제하는 스위칭 회로(127a 내지 127n)에 결합된다. 이 시스템(100'')의 전력 제어 및 주파수 제어(160'')는 동시에 행해지지 않는다.

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

- [0006] 이러한 종래의 기술 및 방법에는 단점이 존재한다. 종래의 기술 및 방법에서는 적어도 2개의 개별적인 모듈을 필요로 하기 때문에 통상적으로 더 많은 비용이 관련된다. 즉, 전송 라인을 통해 연결되는, 1) RF 발생기/증폭기 및 2) 임피던스 정합 네트워크이다. 게다가, 각 모듈은 RF 전압/전류 센서 또는 크기/위상 검출기를 필요로 한다.
- [0007] 플라즈마 임피던스는 플라즈마에 전달되는 전력의 함수이다. 게다가, RF 발생기에 의해 전달되는 전력은 발생기 측에서 보는 임피던스의 함수이다. 그 결과, 전달된 전력 및 로드 임피던스 간에 명백한 순환성 상호 의존성이 존재하여 다입력 다출력(MIMO) 시스템에 크로스 커플링이 발생하게 된다. 종래 기술의 시스템에서는, RF 발생기 제어 루프 및 임피던스 정합 제어 루프가 독립적이고 이에 따라 전력 제어 및 임피던스 정합 제어 루프 간의 크로스 커플링을 보상할 수 없다. 이에 따라 폐루프 성능이 열화된다.
- [0008] 임의의 피제어 시스템의 동적 응답은 겨우 최저속 기능성 모듈(예를 들어, 센서, 액츄에이터, 또는 제어 시스템 파라미터)만큼 빠르다. 종래 기술의 시스템에서, 최저속 기능성 모듈은 통상적으로 DC 전원이다. 특히, RF 전력 증폭기의 입력에 공급되는 DC 전력은 일반적으로 보다 높은 주파수를 필터링하는 데 사용되는 큰 전해 커패시터를 포함한다. 이러한 필터 네트워크를 사용하는 경우의 단점은 제어 갱신율에 상관없이 동적 응답(예를 들어, 전력 커맨드에서 스텝 변경에 대한 응답)이 느리다는 것이다. 따라서, 시스템은 플라즈마 불안정성을 충분히 보상할 수 없다.
- [0009] 모터에 의해 구동되는 진공 커패시터를 사용하는 시스템에서, 응답 시간은 수백 밀리초(millisecond)이다. 수백 밀리초 내에 관심 대상인 플라즈마 과도현상이 발생한다는 사실로 인해, 플라즈마 과도현상으로 인한 로드 변경을 정합하는 데 진공 커패시터를 사용할 수 없다.
- [0010] 종래 기술에서 사용되는 네트워크들을 정합하기 위한 제어 알고리즘들은 측정된 임피던스의 실수부 및 허수부에 의존해 왔다. 임피던스 측정 기반 정합 제어에는 고유의 단점이 존재한다. 예를 들어, 임피던스의 실수부를 정정하거나 수정하기 위한 센트 커패시턴스의 변경으로 인해 그 임피던스의 허수부에 불필요한 변경이 발생하게 된다. 마찬가지로, 임피던스의 허수부를 정정하거나 수정하기 위한 직렬 커패시턴스 또는 주파수의 변경으로 인해 그 임피던스의 실수부에 불필요한 변경이 발생하게 된다. (임피던스의 실수부 및 허수부에 의해 공식화된) 피제어 가변 벡터 및 (센트 커패시턴스 및 직렬 커패시턴스 또는 센트 커패시턴스 및 주파수에 의해 공식화된) 제어 가변 벡터에 관한 매트릭스는 대각(non-diagonal)이 아니다. 따라서 임피던스 측정 기반 제어 알고리즘은 효율적이지 못하다. 임피던스의 크기 및 위상 측정을 이용함으로써 공식화된 임피던스에 기초하는 제어 알고리즘도 마찬가지로 비효율적이다.
- [0011] 종래 기술의 시스템을 위한 미세조정(calibration) 방법은 전자 정합 네트워크의 입력에서 RF 임피던스 분석기 또는 VI 프로브를 미세조정한다. 이러한 미세조정 방법은, 전자 정합 네트워크에서의 전력 손실이 전자 정합 네트워크의 모든 상태 및 동작 주파수에 대하여 고정되어 있다고 가정한다. 그러나, 전자 정합 네트워크의 손실은 전체 시스템 동작에 크게 기여한다.
- [0012] 이에 따라, 동적 플라즈마에 공급되는 전력 및 이에 관련된 손실을 제어하기 위한 방법 및 시스템을 개선할 필요가 있다.

### 과제의 해결 수단

- [0013] 동적 로드에 전력을 전달하는 시스템이 제공된다. 이 시스템은, 대략 일정한 전력 개루프 응답을 갖는 DC 전력을 제공하는 전원과, DC 전력을 RF 전력으로 변환하는 전력 증폭기와, RF 전력에 관련된, 전압, 전류, 전압 벡터와 전류 벡터 간의 위상각을 측정하는 센서와, 전력 증폭기의 임피던스를 수정하여 동적 로드의 임피던스와 적어도 대략적으로 정합시키는 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템과, 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템을 제어하는 컨트롤러를 포함한다. 이 시스템은, 전력 증폭기에 의해 전달되는 전력을 결정하는 센서 미세조정 측정 모듈과, 동적 로드에 전달되는 전력을 결정하는 전자 정합 시스템 미세조정 모듈과, 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템에서 소모되는 전력을 계산하는 전력 소모 모듈을 더 포함한다.
- [0014] 일 실시예에서, 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템은, 인덕터, 인덕터에 직렬로 연결된 커패시터, 동적 로드에 병렬로 연결된 다수의 스위칭(switched) 커패시터를 포함한다. 인덕터는 멀티탭형 인덕터 또는 가변형 인

덕터일 수 있다. 다수의 스위칭 커패시터의 각각은 스위치 및 추가 커패시터에 직렬로 연결될 수 있다. 다른 일 실시예에서, 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템은, 커패시터, 동적 로드에 병렬로 연결된 다수의 스위칭 커패시터를 포함할 수 있고, 다수의 스위칭 커패시터의 각각은 스위치 및 추가 커패시터에 직렬로 연결된다. 또 다른 일 실시예에서, 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템은 전력 증폭기 및 동적 로드 간에 정합되는 임피던스의 주파수를 제어할 수 있다.

[0015] 일 실시예에서, 컨트롤러는 전력 증폭기 및 동적 로드 간의 임피던스에 관련된 컨덕턴스 및 서셉턴스의 동시 제어를 위해 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템을 제어할 수 있다. 다른 일 실시예에서, 컨트롤러는 RF 전력 주파수, RF 전력 크기, 전력 증폭기 및 동적 로드 간의 임피던스를 동시에 제어할 수 있다. 또 다른 일 실시예에서, 컨트롤러는 컨덕턴스 및 서셉턴스를 불안정한 동적 로드를 안정화시키는 설정점으로 조정하도록 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템을 제어할 수 있다.

[0016] 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템에서 소모되는 전력은 전력 증폭기에 의해 전달되는 전력 및 동적 로드에 전달되는 전력 간의 차이다. 동적 로드에 전달되는 전력은 저항성 로드에 전달되는 전력 및 로드 시뮬레이터 내부에서 소모되는 전력의 합이다.

[0017] 센서 미세조정 측정 모듈은 센서를 저항성 로드 내로 미세조정하고, 이 저항성 로드는 50Ω이다. 전자 정합 모듈은 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템의 출력을 로드 시뮬레이터 내로 미세조정한다. 로드 시뮬레이터는 역(inverse) 전기적 제어가능 임피던스 정합 시스템일 수 있다. 전자 정합 시스템 미세조정 모듈은, 저항성 로드에 전달되는 전력을 결정하는 전력 측정기 미세조정 모듈, 및 로드 시뮬레이터 내부에서 소모되는 전력을 결정하는 로드 시뮬레이터 미세조정 모듈을 포함할 수 있다. 저항성 로드는 50Ω일 수 있다.

### 발명의 효과

[0018] 무선 주파수 전력 전달 시스템은 종래 기술의 시스템에 비하여 적어도 다음에 따른 이점을 제공한다. 본 발명의 시스템은, 고속(예를 들어, 일 실시예에서 50kHz를 초과) 디지털 다입력 다출력(MIMO) 제어를 이용하여, 전력 설정점 조정, 임피던스 정합, 로드 교란 완화를 향상시킬 수 있다. 본 발명의 시스템은, 플라즈마 로드 특성에 과도 변경이 존재하고 빠른 플라즈마 안정화에 관련된 상태 하에서 동작할 수 있다. 본 발명의 시스템은 시스템의 기동 동안 과도현상에 대하여 장인한 RF 전력 전달 시스템을 제공할 수 있다. 본 발명의 시스템은 고 전력 스텝업 비를 제공할 수 있으며, 여기서 고 전력 스텝업 비는 100이다(예를 들어, 15W 내지 1500W). 본 발명의 시스템은 집적된 발생기 시스템의 출력에 연결된 로드에 전달되는 전력을 측정할 수 있다. 본 발명의 시스템은 다양한 피제어 변수들의 상태/값에 관련된 전력 손실 변동에 독립적인 전력을 조정할 수 있다. 본 발명의 시스템은 플라즈마 로드에 대한 레시피(recipe) 기반 미세조정을 필요로 하지 않는다.

### 도면의 간단한 설명

[0019] 본 발명의 전술한 그리고 다른 목적들, 특징들, 이점들은, 첨부 도면에 예시되어 있듯이, 본 발명의 바람직한 실시예들의 다음에 따르는 보다 특정한 설명으로부터 명백할 것이다. 도면은 반드시 일정한 비율로 되지 않으며 대신에 본 발명의 원리를 예시하고자 강조된다.

도 1a는 종래 기술에 따른 2축 투닝가능 정합 네트워크를 갖는 RF 전력 전달 시스템을 도시한다.

도 1b는 종래 기술에 따른 고정된 정합 네트워크를 갖는 RF 전력 전달 시스템을 도시한다.

도 1c는 종래 기술에 따른 집적된 RF 발생기-임피던스 정합 네트워크를 갖는 RF 전력 전달 시스템을 도시한다.

도 2는 모듈 기반의 온챔버(On-Chamber) RF 전력 전달 시스템을 도시한다.

도 3은 플라즈마 안정성을 도시하는 그래프이다.

도 4는 도 2의 패스트 DC 버스의 일 실시예를 도시한다.

도 5는 도 2의 RF 임피던스 분석기 또는 VI 프로브의 일 실시예를 도시한다.

도 6은 도 2의 전자 정합 네트워크의 일 실시예를 도시한다.

도 7은 모듈 기반의 도 2의 DSP 보상기 보드의 일 실시예를 도시한다.

도 8은 온챔버 RF 전력 전달 시스템을 미세조정하는 블록도이다.

도 9a는 전력 측정기를 50Ω 칼로리미터 전력 기준으로 미세조정하는 일 실시예를 도시한다.

도 9b는 로드 시뮬레이터를 DC 전력 기준으로 미세조정하는 일 실시예를 도시한다.

도 9c는 RF 임피던스 분석기를 50Ω 로드로 미세조정하는 일 실시예를 도시한다.

도 9d는 로드 시뮬레이터 내부로 전달되는 전력을 미세조정하는 일 실시예를 도시한다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0020]

일반적으로, 동적 로드 애플리케이션(예를 들어, 유도성 및/또는 용량성 플라즈마 로드)을 위한 집적된 무선 주파수(RF) 전력 전달 시스템이 제공된다. 도 2는 집적된 무선 주파수(RF) 전력 전달 시스템(200)을 예시하고 있다. 이 집적된 시스템(200)의 대표적인 기능성 모듈들은, 패스트 DC 버스(210), RF 전력 증폭기(PA; 220), 디지털 신호 프로세서(DSP) 보상기 보드(230), RF 임피던스 분석기 또는 VI 프로브(240), 및 전자 정합 네트워크(250)를 포함한다. 이 시스템(200)은 플라즈마 로드(260)에 결합된다. 집적된 시스템(200)이 넓은 범위의 저항성 로드 및 반응성 로드에 대하여 구현될 수 있다는 것을 당업자라면 이해할 것이다.

[0021]

일반적으로, 패스트 DC 버스(210)는 DC 전력을 전력 증폭기(220)에 전달한다. 전력 증폭기(220)는 한 주파수에서 패스트 DC 버스(210)로부터의 DC 전력을 RF 전력으로 변환한다. 전자 정합 시스템(250)은, 센트 커페시터들(도시하지 않음)을 스위칭하여 전력 증폭기(220) 및 플라즈마 로드(260) 간의 임피던스를 정합하여 전력 증폭기(220)로부터 플라즈마 로드(260)로의 안정적이면서 최대 전력 전달을 용이하게 한다. DSP 보상기 보드(230)는, 패스트 버스 컨트롤러(212) 및 RF 임피던스 분석기(240)로부터 수신된 측정에 기초하여 시스템(200)의 동작을 제어한다. RF 임피던스 분석기(240)는 RMS 전압, RMS 전류, RF 전압 벡터 및 RF 전류 벡터 간의 위상각을 측정한다. 이러한 측정에 기초하여, 관련 RF 파라미터들이 DSP 보상기 보드(230)에 의해 계산된다. 이러한 파라미터들은, 임피던스 벡터( $\bar{Z}$ ), 어드미턴스 벡터( $\bar{Y}$ ), 전달 전력( $P_{del}$ ), 전압 정재파비(VSWR)를 포함하지만, 이러한 예로 한정되지는 않는다. DSP 보상기 보드의 통상적인 연산들에는, 패스트 버스 컨트롤러(212)를 통한 전력 설정점, 전력 증폭기 드라이버(222)를 통한 RF 전력 주파수 설정점, 및 전자 정합 컨트롤러(252)를 통한 스위칭 주파수가 포함된다.

[0022]

일 양태에서, 시스템(200)은 전력 및 임피던스의 동시 조정을 달성한다. 독립적 서셉턴스 조정은, 컨덕턴스의 컨덕턴스 설정점으로부터의 편이에만 기초하는 주파수 제어 알고리즘을 구현할 수 있게 한다. 그 결과, 제어 루프들 둘 다가 동시에 그리고 고속으로 동작될 수 있어서 강인성(robustness)이 개선된다. 게다가, 잘 알려져 있는 저압에서의 음전성 플라즈마(예를 들어, 도 3에 도시한 바와 같이 300W 및 5mT에서 SF6)의 불안전성이, 패스트 DC 버스(210)의 동작과 함께 임의의 컨덕턴스 및 서셉턴스 설정점들을 설정함으로써, 안정화될 수 있다.

[0023]

도 4는 부분적 공명 인버터 전원형 패스트 DC 버스(210)를 도시한다. 패스트 DC 버스(210)는 자신의 관련된 정전력 개루프 응답으로 인해 프로세스 안정성을 제공한다. 패스트 DC 버스(210)는 전체 로드 공간에 대한 FET 활용성을 개선하며 이에 따라 동일한 PA(220)(도 2 참조)를 이용하는 경우 더 많은 전력이 로드에 전달된다. 패스트 DC 버스(210)는 PA(220) 상의 FET들이 안전 모드에서 동작하는 것을 보장하도록 버스 전압을 줄이는 유연성을 허용하는 한편 플라즈마가 소멸되지 않도록 플라즈마에 증가된 전력을 전달할 수 있게 하는 빠른 응답률을 갖는다. 패스트 DC 버스(210)에 대하여 다른 형태들의 토폴로지를 이용할 수 있다. 예를 들어, 공동 계류 중인 일부계속출원 및 이것의 부(parent)출원인 2004년 9월 22일자로 출원한 미국 출원번호 제10/947,397호를 참조하기 바라며, 이러한 각 출원의 전체 교시는 본 명세서에 참고로 포함된다.

[0024]

일 실시예에서, 패스트 DC 버스는, 한 쌍의 스위치(MOSFET; 302a, 302b), 인덕터(L; 306), 커페시터(C; 308), 및 4개의 다이오드(310a, 310b, 310c, 310d)를 포함하는 부분적 공명 인버터(210)일 수 있다. 동작시, 부분적 공명 인버터(210)는 입력 전압을 정현파 또는 다른 알려져 있는 유형의 DC 파형으로 변환한다. 정현파는 인덕터(306) 및 커페시터(308)를 통해 전달되고, 이들의 조합이 LC 필터를 형성하게 되며, 이것은, 다이오드(310c, 310d)에 의해 클램핑되고, 결합되어 변압기 정류기(304)에 의해 정류되고 필터링되어 원하는 DC 전압(전력 설정 점)을 얻게 된다. DC 전력 설정점은 DSP 보상기 보드(230)로부터 제공된다(도 2 참조). 원하는 임피던스 설정 점은 (어드미턴스라 칭하는) 벡터 인버스(vector inverse)로 특정될 수 있으며 컨덕턴스를 임의의 컨덕턴스 설정점으로 그리고 서셉턴스를 임의의 서셉턴스 설정점으로 동시에 조정한다. 부분 공명 인버터(300)(DC-DC 변환기)의 출력은 RF 전력 발생기/증폭기(220)의 DC 입력에 연결된다.

[0025]

동작시, 커페시터(308)는 입력 레일(rail) 전압(+Vin)으로 주기적으로 충전되고 커페시터 전류가 플라즈마 로드

(260)를 통해 전달되는 동안 방전된다(도 2 참조). 모든 충전 또는 방전 사이클마다 저항성 로드에 축적되는 에너지는  $CV^2/2$ 이며, 이것은 로드 저항에 무관하다. 따라서, 전력은  $F_{SW} \times CV^2/2$ 이며, 여기서  $F_{SW}$ 는 스위칭 주파수이고  $V$ 는 입력 전압이다. 인덕터(306)는 커패시터(308)가 유한 시간으로 완전히 충전 및 방전되는 것을 보장한다. 부분적 공명 인버터(300) 설계의 한 가지 이점은  $V$  및/또는  $F_{SW}$ 를 가변함으로써 출력 전압을 제어하는 기능에 있다.

[0026] 도 5는 RF 임피던스 분석기 또는 VI 프로브(240)의 일 실시예를 도시한다. VI 프로브(240)는 DC 전원(242), 분석 보드 어셈블리(244), 및 프로브 헤드 어셈블리(246)를 포함한다. 분석 보드 어셈블리(244)는 프로브 헤드 어셈블리(246)로부터 저 레벨 RF 신호를 수신한다. 프로브 헤드 어셈블리(246)는 2개의 전압 출력을 제공한다. 즉, 1) 프로브 헤드 어셈블리(246)에 존재하는 시변 전계의 전압 표현(전압 신호), 및 2) 프로브 헤드 어셈블리(246)에 존재하는 시변 자계의 전압 표현(전류 신호)이다. 분석 보드 어셈블리(244)는 프로브 헤드 어셈블리(246)의 2개의 전압 출력을 수신 및 처리하여 RF 파라미터들을 DSP 보상기 보드(230)에 출력한다(도 2 참조). MKS Instruments, Inc. 회사의 VI-Probe-4100 및 VI-Probe-350은 이러한 목적으로 사용될 수 있는 예시적인 분석기들이다.

[0027] 도 6은 전자 정합 네트워크(250)의 일 실시예를 도시한다. 일 실시예에서, 전자 정합 네트워크(250)는, 로드(260)에 직렬로 연결된 인덕턴스(254)(예를 들어, 멀티탭형 컴팩트 인덕터), 고정된 또는 가변 직렬 패딩 커패시터(252), 및 하나 이상의 상위 커패시터( $C_{u(i)}$ ; 258a 내지 258n)들을 대응하는 하위 커패시터( $C_{d(i)}$ ; 258a' 내지 258n')들로 스위칭하는 전계 효과 트랜지스터(FET; 256a 내지 256n)를 포함하고, 이 하위 커패시터들은 그라운드에서 종단된다. 일부 실시예들에서, 전자 정합 네트워크(250)는 로드(260)에 직렬로 연결된 인덕턴스(254)를 포함하지 않는다. 다른 유형의 전자 정합 네트워크를 이용할 수 있다. 예를 들어, 미국 특허번호 제6,887,339호를 참조하기 바라며, 이것의 전체 교시는 본 명세서에 참고로 포함된다.

[0028] 도 7은 모듈 기반의 DSP 보상기 보드(230)를 도시한다. DSP 보상기 보드(230)는, 디지털 신호 프로세서(DSP) 및 필드 프로그래머블 게이트 어레이(FPGA) 둘 다를 포함하며, 전체 집적된 시스템(200)을 함께 제어한다. DSP 보상기 보드는, 어드미턴스 보상 모듈(232), 주파수 제어 모듈(234), 전자 정합 제어 모듈(236), RF 전력 계산 모듈(237), RF 전력 제어 모듈(238)을 포함한다. 일반적으로, DSP 보상기 보드는 VI 프로브(240)로부터의 출력을 수신한다. 어드미턴스 계산 모듈(232)은 VI 프로브 출력을 이용하여 시스템(200)의 어드미턴스를 계산한다. 주파수 제어 모듈(234)은 어드미턴스를 이용하여 전력 증폭기(220)의 주파수를 가변한다. 전자 정합 제어 모듈(236)은 어드미턴스를 이용하여 전자 정합 네트워크(250)의 FET(256)들을 스위칭 온 또는 스위칭 오프한다. RF 전력 계산 모듈(237)은 VI 프로브 출력을 이용하여 시스템(200)의 RF 전력을 계산한다. RF 전력 제어 모듈(238)은 RF 전력 계산을 이용하여 패스트 DC 버스(210)로부터 공급되는 전력을 조정한다. 시스템(200)의 동작의 보다 상세한 설명은 후술되어 있다.

[0029] 전력 조정 오브젝티브 및 알고리즘의 일 실시예가 아래와 같이 설명되어 있다. 즉, 오브젝티브는 전달 전력( $P_{del}$ )을 사용자 정의 설정점( $P_{sp}$ )으로 조정하는 것이다. 부드러운 천이를 보장하려면, 케도 발생기를 사용한다. 일 실시예에서, 일차 케도는 다음과 같이 발생한다.

### 수학식 1

$$\frac{dP_t}{dt} = \frac{1}{\tau_t} (P_t(t) - P_{sp})$$

[0030]

[0031] 여기서,  $\tau_t$ 는 케도 시간 상수이고  $P_t$ 는 원하는 전력 케도이다. 패스트 버스로 제어되는 전력 변경으로 표현된 전달 전력 제어 알고리즘은 다음과 같은 식으로 주어진다.

## 수학식 2

$$P_{cmd} = k_p (P_t - P_{del}) + k_i \int (P_t - P_{del}) dt$$

[0032]

[0033] 여기서,  $k_p$  및  $k_i$ 는 각각 비례 이득 및 적분 이득이다.

[0034] 어드미턴스 조정 오브젝티브: 정규화된 어드미턴스 벡터는 다음과 같이 정의된다.  $\bar{y} = g + jb$ , 여기서,  $g$ 는 정규화된 컨덕턴스이고  $b$ 는 정규화된 셔셉턴스이다. 임피던스 정합 제어 오브젝티브는 다음과 같이 공식화된다.  $g \rightarrow g_{sp}$  및  $b \rightarrow b_{sp}$ , 여기서,  $g_{sp}$  및  $b_{sp}$ 는 플라즈마 안정성을 개선하도록 선택되는 임의의 설 정점들이다. 전술한 오브젝티브는, 임피던스가 어드미턴스의 역(reciprocal)으로서 정의된다는 점에 주목함으로써, 다음과 같은 관계에 따른 임피던스로 재해석된다.

## 수학식 3

$$z = \frac{1}{y} = r + jx = \frac{R + jX}{Z_0} = \frac{R + jX}{R_0 + j0}$$

[0035]

[0036] 여기서,  $z$ 는 정규화된 임피던스이고,  $r$  및  $x$ 는 각각 저항 및 리액턴스이며,  $Z_0 = R_0 + j0$ 는 공칭  $R_f$  증폭기 특징적 임피던스를 나타낸다. 이것은,  $g > 1$  및  $b > 0$ 일 때,  $R > R_0$  및  $X > 0$ 을 얻는다는 점을 따른다.

[0037]

어드미턴스 조정 알고리즘: 주파수 제어 루프는 컨덕턴스 측정을 예를 들어 아래와 같은 PI 제어 알고리즘으로서 이용함으로써 설계된다.

## 수학식 4

$$f_{cmd} = -k_{pf} (g_{sp} - g) - k_{if} \int (g_{sp} - g) dt$$

[0038]

[0039] 여기서,  $k_{pf}$  및  $k_{if}$ 는 스칼라 비례 및 적분 제어 이득들이다. 센트 커패시턴스 제어 루프는 컨덕턴스 측정을 예를 들어 아래와 같은 PI 제어 알고리즘으로서 이용함으로써 설계된다.

## 수학식 5

$$C_{icmd} = -k_{pc} (b_{sp} - b) - k_{ic} \int (b_{sp} - b) dt$$

[0040]

[0041] 여기서,  $k_{pc}$  및  $k_{ic}$ 는 스칼라 비례 및 적분 제어 이득들이다.

[0042]

동작시, 도 2, 도 3 및 도 6을 참조해 보면, 사용자가 넌제로(non-zero) 설정점을 제공한 후에, 케도 발생기 및 전력 및 어드미턴스 제어 알고리즘들은 동시에 활성화되고 실행된다. VI 프로브(240)는 RF 전압 및 RF 전류에 비례하는 아날로그 신호들을 제공하고, 이 신호들은 아날로그 대 디지털 변환기들에 의해 동기 샘플링되고, 혼합기 및 CIC 필터(도시하지 않음)에 전송되며 최종적으로 미세조정 매트릭스를 통해 전송되어 다음에 따르는 관계들에 의해 주어지는 RF 전압 및 RF 전류 측정값들을 얻게 된다.

## 수학식 6

$$\bar{V} = V_r + jV_i \text{ and } \bar{I} = I_r + jI_i$$

[0043]

[0044] 여기서,  $\bar{V}$ ,  $\bar{I}$ 는 각각 순간 RF 전압 및 전류의 벡터 표현들을 나타내며, 아래 첨자 r 및 i는 실수부 및 허수부의 스칼라값들을 나타내는 데 사용된다.

[0045]

평균 전달 전력은 다음과 같이 계산된다.

## 수학식 7

$$P_{\text{del}} = \frac{1}{2} \text{Re}\{\bar{V}\bar{I}^*\} = V_r I_r + V_i I_i$$

[0046]

여기서,  $\text{Re}\{\}$ 는 벡터의 실수부를 나타내며, 위 첨자 \*는 벡터의 복소 공액을 나타낸다.

[0047]

[0048] 이후, 어드미턴스 벡터( $\bar{Y}$ )는 다음과 같이 계산된다.

## 수학식 8

$$\bar{Y} = \frac{\bar{I}}{\bar{V}} = \frac{(I_r V_r + I_i V_i)}{V_r^2 + V_i^2} + j \frac{(I_i V_r - I_r V_i)}{V_r^2 + V_i^2} \equiv G + jB$$

[0049]

[0050] 여기서, 컨덕턴스(G) 및 서셉턴스(B)는 어드미턴스( $\bar{Y}$ )의 실수부 및 허수부이다.

[0051]

정규화된 컨덕턴스(g) 및 정규화된 서셉턴스(b)는 다음과 같이 계산된다.

## 수학식 9

$$g = Z_0 G = Z_0 \frac{(I_r V_r + I_i V_i)}{V_r^2 + V_i^2} \text{ and } b = Z_0 B = Z_0 \frac{(I_i V_r - I_r V_i)}{V_r^2 + V_i^2}$$

[0052]

[0053] 여기서,  $Z_0$ 는 RF 증폭기의 특징적 임피던스를 나타낸다.  $P_{\text{del}}$ , g, b의 측정값들은 각각  $P_{\text{cmd}}$ , F<sub>cmd</sub>, C<sub>t cmd</sub>를 위한 제어 알고리즘들에 전송된다.

[0054]

전자 정합 컨트롤러(252)는 FET(256)들(도 6 참조)을 스위칭하고 이에 따라 션트 커패시터(258)들을 스위칭하여 전력 증폭기(220) 및 동적 로드(260) 간의 임피던스를 정합시킨다. 동적인 기계 부품들이 없기에 더욱 높은 신뢰성을 얻게 된다. 일 실시예에서, 시스템(200)의 스텝 응답은 약 1ms보다 빠르며 그 이유는 응답 속도가 기계적 응답이 아닌 전자적 구성에 의해 좌우되기 때문이다.

[0055]

주파수 변경으로 인해 컨덕턴스 및 서셉턴스 모두에 변경이 발생한다. 그러나, 전송 라인 케이블이 없는 집적된 시스템에 대해선, 션트 커패시턴스의 변경으로 인해 서셉턴스에만 변경이 발생하고 컨덕턴스 값에는 영향을 끼치지 않는다. 따라서, (어드미턴스의 실수부 및 허수부에 의해 공식화된) 피제어 가변 벡터 및 (션트 커패시턴스 및 직렬 커패시턴스 또는 션트 및 주파수에 의해 공식화된) 제어 가변 벡터에 관한 매트릭스는 삼각형이다. 그 결과, 션트 커패시턴스를 가변시킴으로써 독립적인 서셉턴스 조정을 달성한다.

[0056]

독립적 서셉턴스 조정은, 컨덕턴스의 컨덕턴스 설정점으로부터의 편이에만 기초하는 주파수 제어 알고리즘을 구현할 수 있게 한다. 그 결과, 컨덕턴스 기반 주파수 제어 루프 및 서셉턴스 기반 션트 커패시턴스 제어 루프

모두가 동시에 그리고 고속으로 동작할 수 있어서, 장인성이 개선된다.

[0057] 도 8은 시스템(200)의 효율을 개선하도록 전자 정합 네트워크(250)(도 2 참조)에서 소모되는 전력(손실)을 결정하는 방법의 블록도(300)이다. 스텝 1(310)에선, 전력 측정기(314)(도 9a 참조)를 50Ω 칼로리미터 전력 기준으로 미세조정하여 50Ω 로드에 전달되는 전력을 결정한다. 스텝 2(320)에선, 로드 시뮬레이터 칼로리미터(332)(도 9b 참조)를 DC 전력 기준으로 미세조정하여 로드 시뮬레이터(342)(도 9d 참조) 내부에서 소모되는 전력을 결정한다. 스텝 3(330)에선, VI 프로브(240)(도 2 참조)를 50Ω 로드로 미세조정하여 전력 증폭기(220)(도 2 참조)에 의해 전달되는 전력을 결정한다. 스텝 4(340)에선, 시스템(200)의 출력을 로드 시뮬레이터(342)로 미세조정하여  $Z_L = R_L + jX_L$ 에 전달되는 전력을 결정한다. 스텝 5(350)에선, 전력 증폭기(220)에 의해 전달되는 전력 및  $Z_L = R_L + jX_L$ 에 전달되는 전력 간의 차에 의해 전자 정합 시스템에서 소모되는 전력을 계산한다.

[0058] 도 9a는 전력 측정기(314)를 미세조정하는 스텝(310)의 상세한 구현예를 도시한다. 칼로리미터(322)는 VI 프로브(240)의 출력에 결합되고, RP 전력은 전력 증폭기(220)로부터 인가되며, 전력 측정기(314)가 미세조정된다. 칼로리 측정은 열적 손실의 측정이다. 이것은 칼로리미터(322)에서 50Ω 로드를 열적 절연시켜 주변 열적 손실

을 방지하고 냉각수의 유속 및 온도 상승을 측정함으로써 구현된다. 전력 측정기는  $Q = \frac{dm}{dt} C(T_{out} - T_{in})$ 에 의해 계산되는 로드에서의 전력 소모로 미세조정되고, 여기서,  $dm/dt$ 는 대량 유속을 나타내며,  $C$ 는 물의 특정 비열을 나타내며,  $T_{in}$  및  $T_{out}$ 은 각각 입구(inlet) 및 출구(outlet) 온도를 나타낸다. 컴퓨터(324)는 유속 및 온도 측정값들을 획득하여 전력 측정기의 판독에 대하여 차이(에러) 및 로드에서의 전력 소모를 계산한다. 이후, 컴퓨터(324)는 이러한 에러를 정정값으로서 전력 측정기에 인가하여 미세조정을 완료한다.

[0059] 도 9b는 로드 시뮬레이터 칼로리미터(332)를 미세조정하기 위한 스텝(320)의 상세한 구현예를 도시한다. 로드 시뮬레이터 칼로리미터(332)는 DC 전원(334)에 결합되고, DC 전력이 인가되며, 로드 시뮬레이터 칼로리미터(332)가 미세조정된다. DC 전원은 DC 전력 측정값들을 공급한다. 냉각 시스템의 입구 및 출구에서의 유속 및 온도 측정값들을 이용함으로써, 컴퓨터(324)는 로드 시뮬레이터에서 소모되는 전력을 계산한다. 이후, 컴퓨터(324)는 DC 전원에 의해 보고되는 전력 및 칼로리미터 방식을 이용하여 계산되는 전력 간의 에러를 정정값으로서 로드 시뮬레이터에 인가하여 미세조정을 완료한다.

[0060] 도 9c는 RF 임피던스 분석기 또는 VI 프로브(240)를 미세조정하기 위한 스텝(330)의 상세한 구현예를 도시한다. 일반적으로, 집적된 RF 발생기 시스템(200) 내의 각 VI 프로브(240)는, DSP 보상기 보드(230)에 의해 측정되는 VI 프로브 전압 및 전류를 실제 RF 라인 전압 및 전류에 관련시키는 매트릭스 전달 함수를 얻게 하는 다음에 따르는 스텝들을 포함한다.

[0061] 첫 번째로, 단락 회로 커넥터(312)는 VI 프로브(240)의 RF 라인 출력 단자에 결합되고, RF 전력은 전력 증폭기(220)로부터 인가되고,  $Z_{sc}^{dsp}$  가 계산되며, 여기서,  $Z_{sc}^{dsp}$  는 단락 회로용 DSP 보상기 보드(230)에 의해 측정되는 바와 같은 비( $V_{dsp}/I_{dsp}$ )로서 정의된다. 두 번째로, 개방 회로 커넥터(314)가 VI 프로브(240)의 RF 라인 출력 단자에 결합되고, RF 전력이 전력 증폭기(220)로부터 인가되고,  $Z_{oc}^{dsp}$  가 계산되고, 여기서,  $Z_{oc}^{dsp}$  는 개방 회로용 DSP 보상기 보드(230)에 의해 측정되는 바와 같은 비( $V_{dsp}/I_{dsp}$ )로서 정의된다. 세 번째로, 50Ω 로드( $Z_L$ ; 316)는 VI 프로브(240)의 출력에 결합되고, RF 전력이 전력 증폭기(220)로부터 인가되고,  $V_L$  및  $I_L$ 이 기록되며 RF 라인 전압( $V_L$ )이 계산되고, 여기서,  $V_L = \sqrt{P_L Z_L}$  이다.  $P_L$ 은 50Ω 로드(316)에서 전력 측정기(318)에 의해 측정되는 전달 전력이다. 마지막으로, VI 프로브 미세조정 매트릭스 전달 함수는 다음의 식에 의해 계산된다.

## 수학식 10

$$\begin{bmatrix} V_L(t) \\ I_L(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_L}{V_m - Z_{sc}^{dsp} I_m} & \frac{-Z_{sc}^{dsp} V_L}{V_m - Z_{sc}^{dsp} I_m} \\ \frac{-V_L}{Z_L (-Z_{sc}^{dsp} I_m - V_m)} & \frac{Z_{sc}^{dsp} V_L}{Z_L (-Z_{sc}^{dsp} I_m - V_m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dsp}(t) \\ I_{dsp}(t) \end{bmatrix}$$

[0062]

[0063] 수학식 10은 VI 프로브 측정 신호들을 VI 프로브(240)의 출력에서의 RF 라인 전압 및 RF 라인 전류로 변역한다.

[0064] 도 9d는 시스템(200)(도 2 참조)을 미세조정하기 위한 스텝(340)의 상세한 구현예를 도시한다. 시스템 레벨 미세조정을 이용하여 네트워크 변수들에 정합하는 값들의 범위에 대하여 전자 정합 네트워크(250)에서의 전력 손실을 정량한다. 로드 시뮬레이터(342)는 전자 정합 네트워크(250)의 출력에 결합된다. 통상적으로, 로드 시뮬레이터는 전자 정합 네트워크(250)에 대하여 역(inverse)인 전자 정합 네트워크이다.  $50\Omega$  로드는 로드 시뮬레이터(342)의 출력에 결합된다. RF 발생기 시스템(200)의 시스템 레벨 미세조정은 다음과 같이 수행된다. 첫 번째로, 직렬 인더턴스는 ll 스텝( $L_s \in [L_{s\min}, L_{s\max}]$ )에서 조절된다. 두 번째로, pp 스텝

( $P_{sp} \in [P_{sp\min}, P_{sp\max}]$  W)에서 전력 설정점 값이 변경된다. 세 번째로, cc 스텝( $C_{tcmd} \in [C_{tcmd\min}, C_{tcmd\max}]$ )에서 션트 커패시턴스 설정점 값이 변경된다. 마지막으로, ff 스텝( $f \in [f_{\min}, f_{\max}]$  Hz)에서 RF 주파수 값이 변경된다.

[0065] 전술한 스텝들의 각 조합에 대하여, 로드 시뮬레이터(342)는 전자 정합 네트워크(250)의 출력에서 임피던스 부정합을 제시하도록 설정된다. 다음으로, RF 전력이 전력 증폭기(220)로부터 인가되고 전력 측정기(314)가 종단 로드(312) 저항을 측정한다. 종단 로드 저항은  $P_{50\Omega}$ 로 표시되고 로드 시뮬레이터(342)의 입력으로 변환된다.

시뮬레이션된 로드는  $P_{sys} = f_{50-to-sim}(P_{50\Omega}, C_1, C_2)$  와 같은  $P_{sys}$ 로 표시되고, 여기서,  $C_1$  및  $C_2$ 는 로드 시뮬레이터의 직렬 커패시턴스 및 션트 커패시턴스를 나타내고,  $f_{50-to-sim}$ 는 테이블로 된 구성을 나타낸다. 전자 정합 네트워크(250)에서 관련된 손실은  $P_L$  및  $P_{50\Omega}$  간의 차이에 의해 계산된다.

[0066] 일부 실시예들에서, 치수  $ll \times pp \times cc \times ff$  를 갖는 미세조정 테이블은 비휘발성 메모리(예를 들어, 플래시 메모리)에  $P_{sys} = f_{VI-to-sim}(L_s, P_{sp}, C_{tcmd}, f)$  로서 저장될 수 있고, 여기서,  $f_{VI-to-sim}$ 은 테이블로 된 구성을 나타낸다. 고속 실시간 제어 루프들은 시스템(200)의 동작 동안 미세조정 테이블을 통한 빠른 검색을 필요로 한다. 비휘발성 메모리(예를 들어, 플래시 메모리)는 휘발성 메모리(예를 들어, 다이나믹 RAM)보다 느린 경향이 있다. 고속 휘발성 메모리는 효율적으로 활용되며, 여기서, 미세조정 테이블의 구성(치수  $ll \times pp \times cc \times ff$ )은,  $L_s$ ,  $P_{sp}$ ,  $C_{tcmd}$ ,  $f$ 가 얼마나 자주 변경되는지에 기초할 수 있다. 특히, 미세조정 테이블은 메모리 블록들로 세그먼트화될 수 있다. 즉, 각 블록이 pp 메모리 페이지들을 포함하고, 각 메모리 페이지가 cc x ff 치수 테이블을 포함한다. 새로운 메모리 블록은  $L_s$ 가 변경될 때 비휘발성 메모리 내로 로딩될 수 있고, 새로운 메모리 페이지는 전력 설정점이 변경될 때 로딩될 수 있으며,  $C_{tcmd}$  및  $f$ 에 관련된 적합한 메모리 페이지에 대한 미세조정 점들은 실시간으로 실행될 수 있다.

[0067] 본 발명의 바람직한 실시예들을 참조하여 본 발명을 특별히 설명하고 도시하였지만, 당업자라면 청구범위에 의해 포함되는 본 발명의 범위로부터 벗어나지 않고서 본 명세서에서 형태 및 상세에 다양한 변경을 행할 수 있다는 점을 이해할 것이다.

## 부호의 설명

[0068] 100: 시스템

110: 고정 주파수 RF 발생기

120: 2축 투닝가능 정합 네트워크

150: 위상 검출기

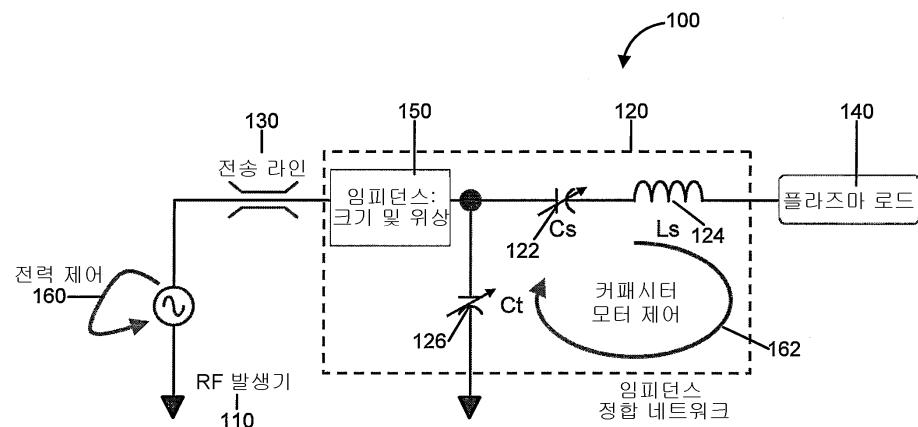
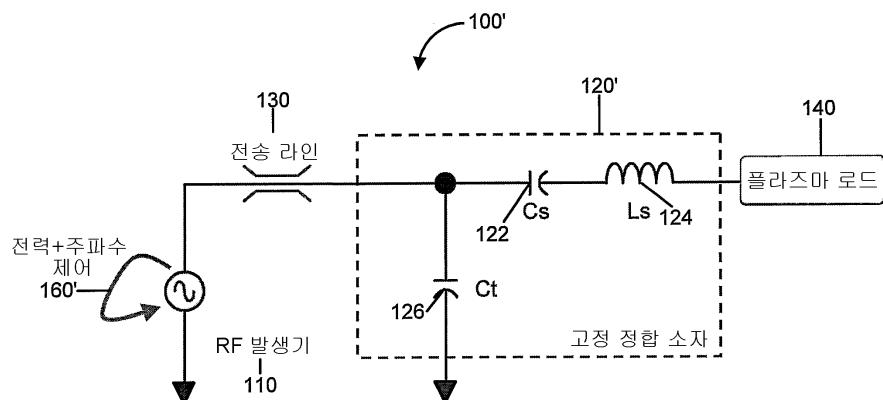
200: 무선 주파수 전력 전달 시스템

210: 패스트 DC 버스

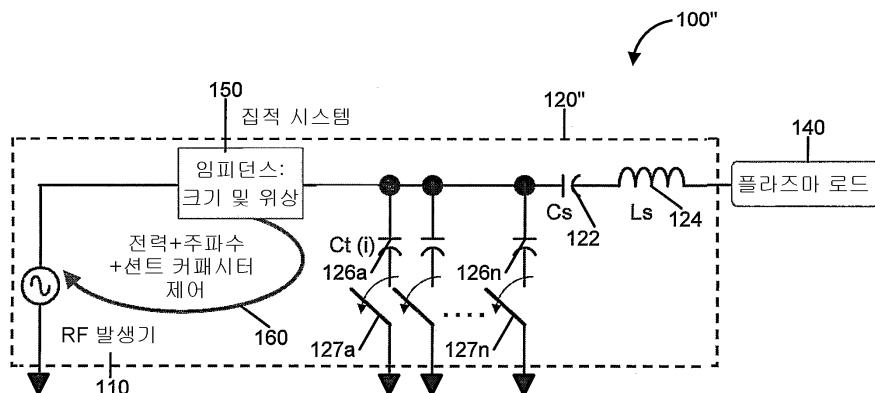
220: 전력 증폭기

240: VI 프로브

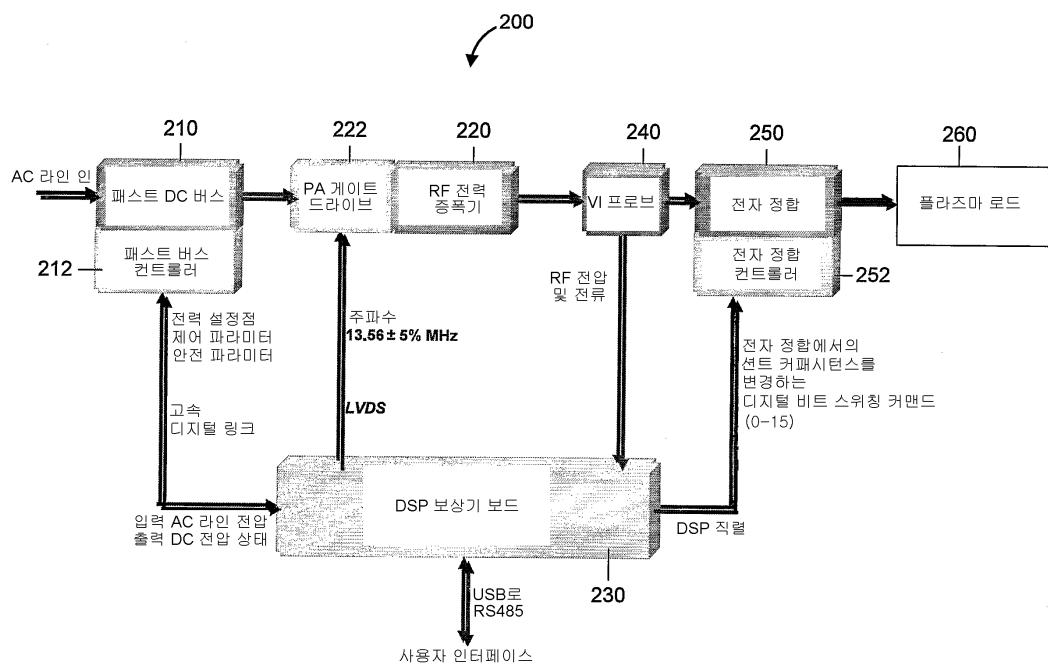
250: 전자 정합 네트워크

**도면****도면1a****도면1b**

## 도면1c

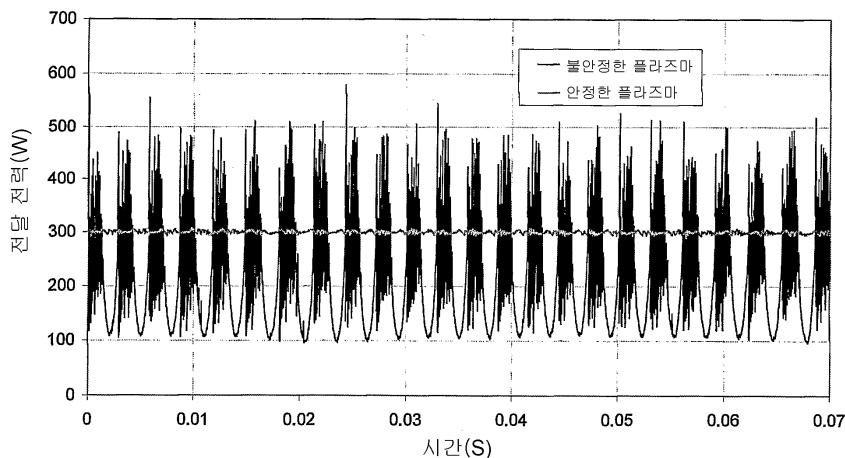


## 도면2

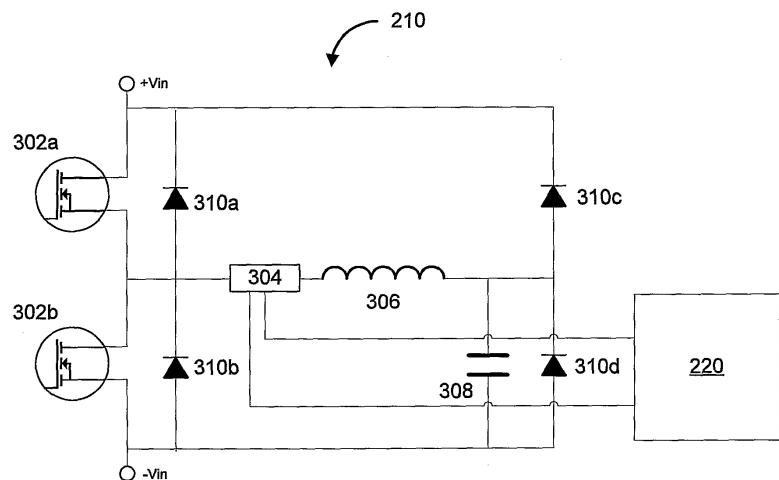


## 도면3

5mT에서의 SF6 플라즈마



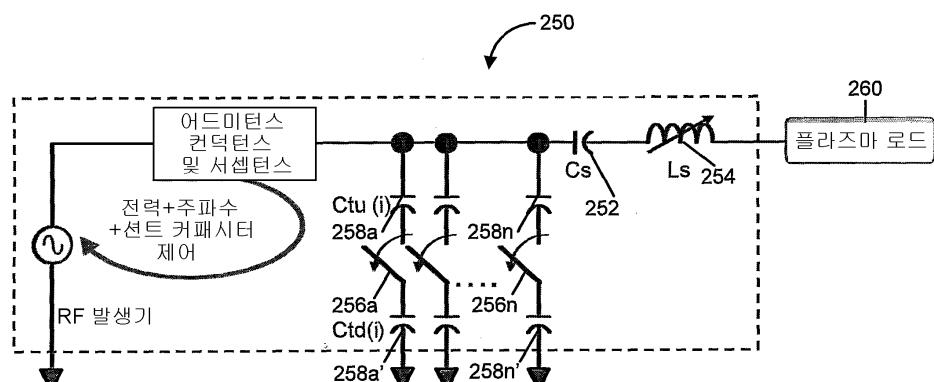
## 도면4



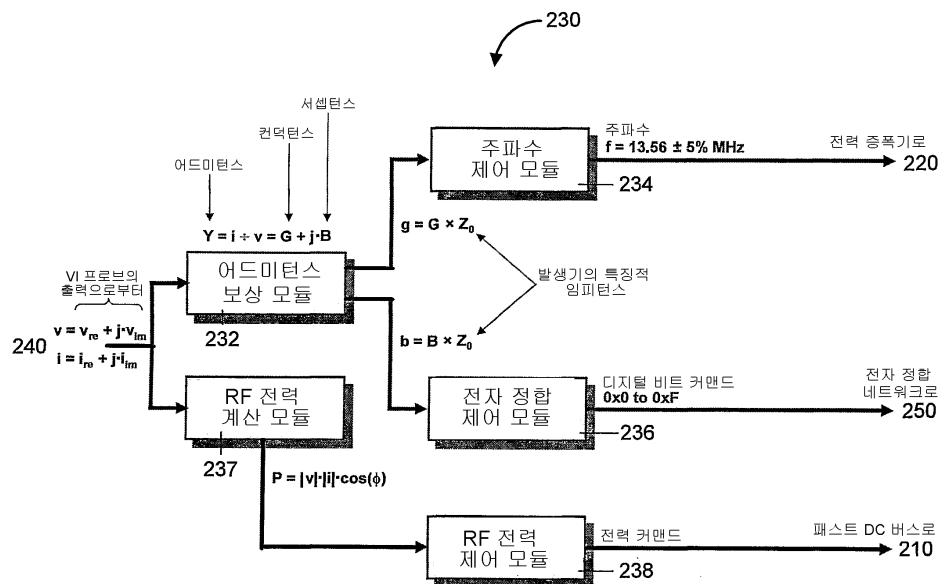
## 도면5



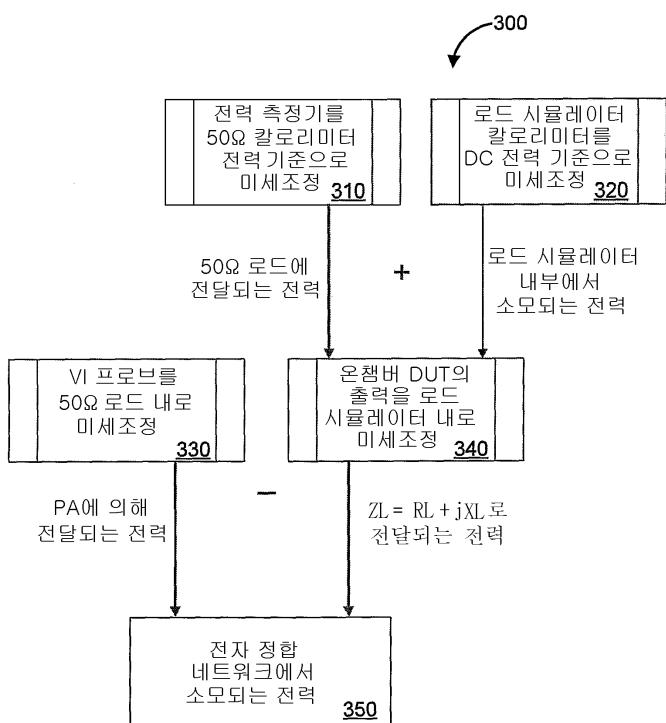
## 도면6



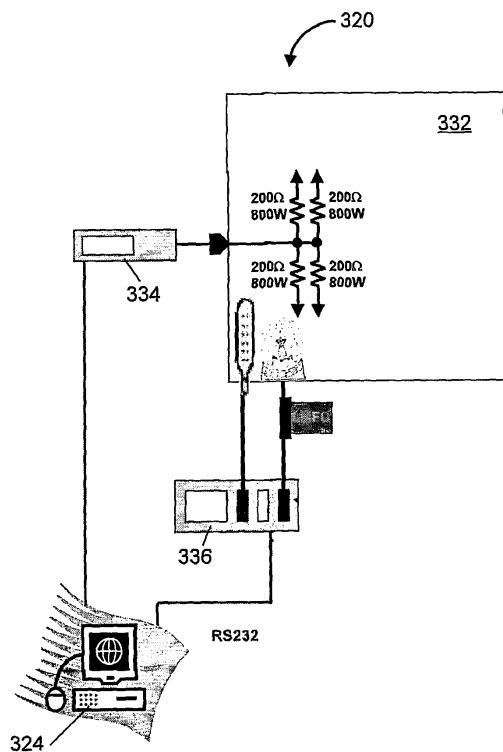
## 도면7



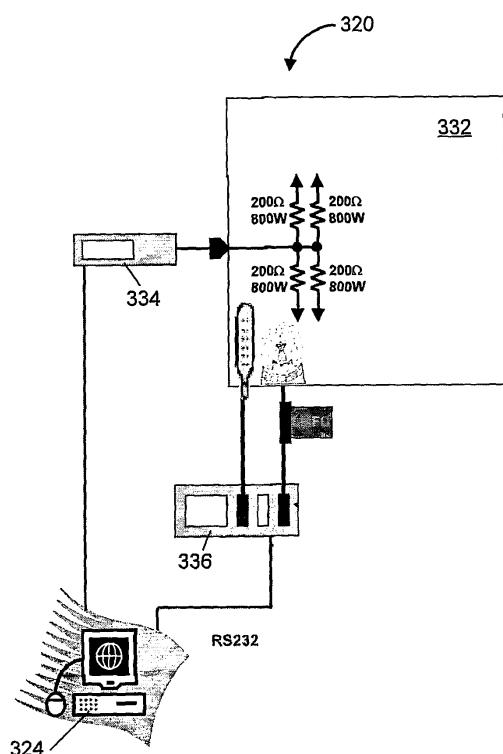
## 도면8



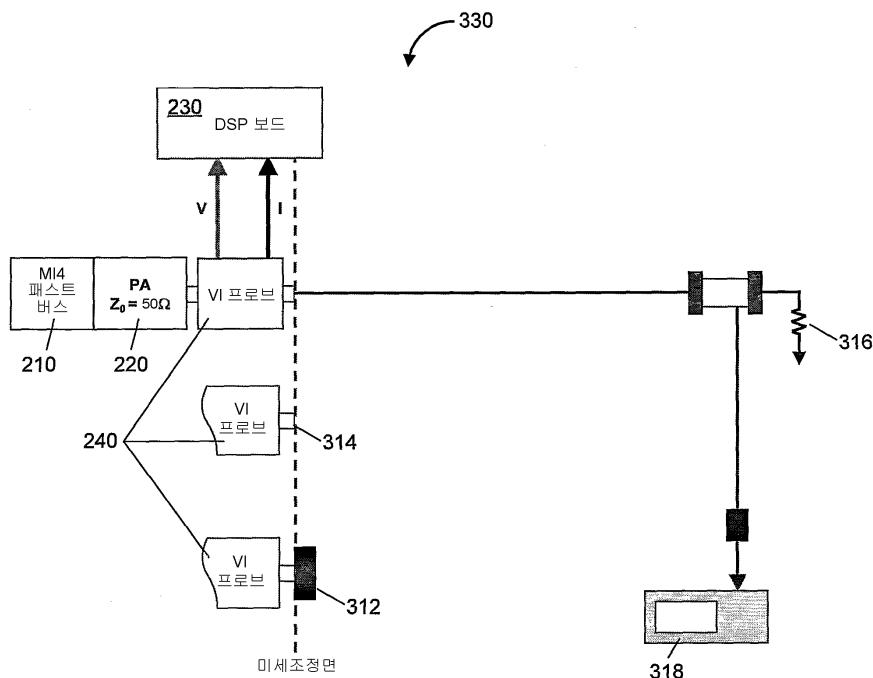
도면9a



도면9b



### 도면9c



## 도면9d

