초전도 Fluxpump 및 교류발전기

고 태 국
(연세대 공대 전기공학과 조교수)

1. 서 론

1911년 Kamerlingh Onnes에 의해 초전도 현상이 발견된 이래 70여년 동안 초전도재료와 그 응용에 대한 연구 개발이 계속되어 왔다.

70여년 전에 발견된 초전도 현상은 그동안 현대 물리학의 가장 궁극적인 목표와 쟁점인 영(zero)과 무한대(infinite)의 개념을 이해하기 위해 가장 가까이 접근했던 가장 큰 현상이었다. 초전도 상태 즉 거시적 관점에서 에너지 손실이 없는 상태는 우연히 실험적인 결과에서 나타난 것이지만, 그 현상 자체를 완전히 이해하기 위해서는 수십여년의 연구가 계속되어왔고 그중 BCS[1] 이론이 많은 도움을 주고있지만 그 신비로운 현상은 아직 현대 물리학의 영원한 이론 과제로 남아 있다.

초전도 상태를 나타내는 초전도 재료에 있어서는 수십여년동안 High-field초전도재료에서는 큰 연구 진보를 해왔지만 가장 중요한 요소인 임계온도에서는 지난 1986년 3월까지 약 70여년 동안 절대온도 4.2°K에서 불과 35°K까지 약 30°K온도상승을 보여왔었다. 그래서 지금까지는 그 냉각 온도를 유지하기 위해서 대기중으로 계속 탈출하고 있는 헬륨을 액화시켜 현재까지 발견된 여러가지 초전도재료의 합금에 사용되어 왔었다. 그러나 초전도 상태를 유지하기 위한 액체 헬륨값은 엄청난 것이어서 사실 지금까지의 응용분야에서는 많은 제한을 받고 있었다. 수십여년 동안 연구진행된 초전도 주요 응용분야로서는 강한자계를 요하는 것으로서 그중 예를들면 초전도 입자가속기, 초전도자석, 초전도발전기와 모터, MHD 발전, Fusion 발전, Josephson Junctions, 의료용으로 쓰이는 NMR 등 거의 주요 초전도전기기기분야에 응용연구가 되어왔었다.

그러던중 1987년 2월 전 세계의 과학계를 깜짝 놀라게한 새로운 연구발표가 있었다. 70여년 동안 불과 30°K 온도상승을 보였던 초전도 재료(Nb 복합재료)가 단지 1년만에 임계온도가 98°K로써 63°K 온도상승을 보인 세라믹성분의 초전도 재료가 "Chu"에 의해서 발견되었다. 이 온도 98°K는 액체질소의 온도를 훨씬 능가하는 것으로서 수십여년동안 과학계 연구가들이 고민해왔던 염원한 숙제를 풀어준 것이었다. 1987년 여름 미국 백악관 학술회의에서 1972년 초전도이론인 BCS이론으로 노벨물리상을 받은 Schrieffer박사는 이번 발견은 전기현상과 반도체현상이 발견된 이래로 가장 큰 과학계의 혁명으로 생각한다는 말을 강조한 적이 있다. 초전도재료를 형성하는 3가지의 중요요소는 임계온도, 임계자계, 임계전류밀도이다. 이번에 발견된 세라믹재료는 가장 중요한 요소인 임계온도를 액체질소온도 훨씬 이상으로 상승한 것에 가장 큰 의의가 있고 임계자계에 있어서도 현재 사용되고 있는 Nb compound인 초전도재료에 비해서도 2배이상의 자계를 유지할 수 있다.(현재 발견된 세라믹 초전도재료인 yttrium-barium-copper-oxide는 임계자계가 100 Tesla이상으로 증명됐고 현재

세계에서 가장 강한 pulsed magnet은 약 50 Tesla의 자계를 만든다.) 그러나 세라믹초전도재료에도 응용면에서는 아직 크게 나누어 2가지의 문제점을 가지고 있다. 첫번째는 여러가지의 형태로 만들기 위한 유연성이 부족하고 두번째는 임계전류밀도가 현재 사용되는 Nb compound 재료에 비해서 낮다는 것이지만 이 문제들은 앞으로 일이년이내에 풀릴 것으로 전망되고 경제적인 면에서 과학계에 혁명을 불어온 액체질소에 의한 새로운 세라믹 초전도재료가 앞으로는 과학계에 전 응용분야에 걸쳐 사용될 것으로 보여진다.

2. 초전도 Rotating-Spot Fluxpump의 주요 작동특성

(1) 초전도 Fluxpump의 응용과 자속펌핑원리

초전도 Fluxpump는 유도성 부하를 위한 극저온 power- supply이다. 이 기기는 사용용도와 부하 용량에 따라서 높은 전류를(100A~1000KA) 요하는 초전도 부하에 다목적으로 사용될 수 있다. 특히 그중 초전도 전자석의 여자기로써 계속 연구 응용되어 왔고 최근에는 초전도 교류발전기의 여자기(Exciter)로써 응용될 수 있도록 많은 연구가 진행중에 있다. 그 중요한 이유는 Fluxpump는 그 자체가 초전도 상태에서 작동되기 때문에 유도부하(inductive load)를 여자(Excite)하기 위해서 실내 온도에서 극저온 상태로 높은 전류가 유입하는 과정에서 발생하는 누설열(Heat leak)과 Ohmic dissipaticon loss를 제거할 수 있다는 큰 장점이 있기 때문이다. 여러가지 형태의 초전도 Fluxpump가 지금까지 계속 연구되어 왔었다.[2][3][4] 이 모든 형태의 초전도 Fluxpump의 기본원리는 초전도회로와 한번 쇄교한 자속(magnetic flux)은 항상 일정하다는 자계자속 보존법칙(magnetic flux-conservation-law)에 근거하고 있다. 그러므로 만약 외부의 어떤 방법을 통해서라도 이 쇄교자속을 변할 수만 있다면 그 회로는 증가된 자속만큼 유지하기 위하여 자체 회로내에서 영구전류를 유기시켜 발생한다는 것이다. 이러한 특성을 이용한 한가지의 응용은 그림1에 보여진 것과 같이 강한 자계를 만들기위한 자계압축기(magnetic field compressor)이다.[5] 그림1에서 전기회로는 가해진 자계와 함께 초전도 상태로 만들어진 후 곧 가해진 자석을 제거시키고 회로자체의 단면적을 감

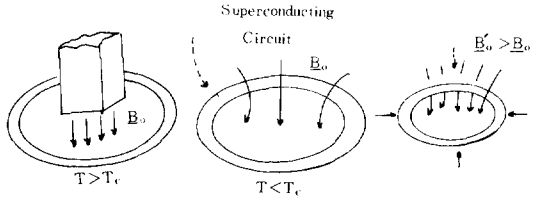

그림 1. Mignetic Field compresser의 원리

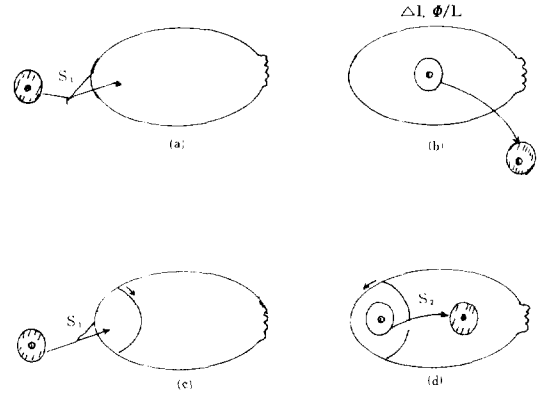

그림 2. 자속펌핑의 원리

소시킨다. 초전도 회로와 쇄교하는 자기자속은 항상 일정하기 때문에 이런 방법은 감소된 면적만큼의 자속밀도 증가를 제공한다. 다음 그림2는 자기자속 보존법칙에 근거한 자속펌핑(flux-pumping)의 원리를 보여준다. 먼저 일반적으로 정상적인 도체로(momal conductor) 구성된 전기회로가 직렬저항 R과 자기인덕턴스(self-inductance) L을 가지고 있다면 폐회로내에서의 유기전압은 다음과 같이 된다.

$$-\frac{d\phi}{dt} = V = RI + \frac{d(LI)}{dt} \qquad (1)$$

초전도 상태에서 저항 R이 사라지고 식(1)을 적분하면 다음과 같다.

$$\phi + LI = 일정(const.) \qquad (2)$$

Flux-pumping의 가장 기본적인 원리는 식(2)의 일정항

을 어떤 외부방법에 의해서 변화시키는 것이다. 먼저 그림2의 (a)에서 보면 초전도회로에 자계를 쇄교시키는 가장 간단한 방법은 먼저 스위치 S_1을 열고 영구자석 또는 전자석에 의해서 발산되는 자속 ϕ을 회로 안으로 들여오는 것이다. 그런후 스위치가 닫히고 자석이 제거된다면 그 즉시 자계자속을 보존시키기 위해 유기전류 $\triangle I=\frac{\phi}{L}$ 이 발생된다(그림2의 (b)). 이러한 과정이 반복되기 전에 다시 스위치를 여는데 있어 이전에 유기된 전류를 보호하기 위해서 특별한 회로가 고려되어야만 한다. 그러한 회로는 그림2의 (c)와 (d)에서 보는 바와 같이 우회로(by-pass)스위치 S_2에 의해서 달성될 수 있다. 먼저 스위치 S_1을 지금 연다면 이전에 유기된 전류 $\triangle I$는 계속 흐르고 있을 것이고, 그 다음 새로운 자속 ϕ을 다시 쇄교시키고 스위치 S_1을 닫고 동시에 스위치 S_2을 열면 유기전류 $\triangle I$는 다시 스위치 S_1을 통해 이동되면서 흐르게 된다. 그후에 스위치 S_1과 쇄교된 자속 ϕ을 제거하는 순간 또다른 유기전류 $\triangle I$가 만들어진다. 이러한 과정이 n번 반복된다면 결국 초전도회로에는 $n\triangle I$의 연구전류가 발생 되어진다. 이러한 Flux-pumping을 이용해 높은 영구 초전류를 발생시키는 것이 초전도 Flux-punps 의 기본원리가 되고 있다. 그러나 기본 응용에 있어서 이렇게 초전도 스위치를 개폐(open-close)하는 것은 실질적인 것이 못되고 그대신 초전도회로상에 유한한 저항을 소개시키는 것이 실제 방법화되고 있다. 이러한 방법은 초전도 회로상에 부분적으로 초전도상태를 소멸(quenching)시킬 수 있는 초전도 재료에 임계온도 또는 임계자료 이상의 값을 이용해서 달성될 수가 있다.

(2) 현재 연구진행중인 초전도 Rotating-Spot Fluxpump

여러가지 형태의 초전도 Fluxpumps들이 지금까지 계속 연구발전되어 왔다. 그중 Rotating-Flux-Spot형태의 Fluxpump가 최근에 들어와서 아주 높은 초전류를 제공할 수 있다는 큰 장점때문에 많은 관심이 집중되고 있다. 그림3은 현재 연구진행중인 Rotating-spot Fluxpump의 대략적인 구조를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 자체 축(shaft)인 AA'에 대해서 회전할 수 있는 원통형 틀(frame)위에 원통 형태로 구성된 Niobium foil이 덮여진다. 그리고 Nb foil주위로 동심원의 형태를 따라 여러개의 영구자석(또는 전자석)이 배열되어 진다. Nb foil을 마주보는 자석들의 극(poles)들은 같은 극성(polarity)을 가지게 되고 각 극(pole)에서 발산되는 자계(magnetic

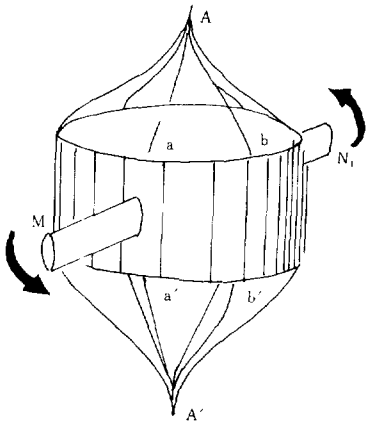

그림 3. Rotating-Spot fluxpump의 구조

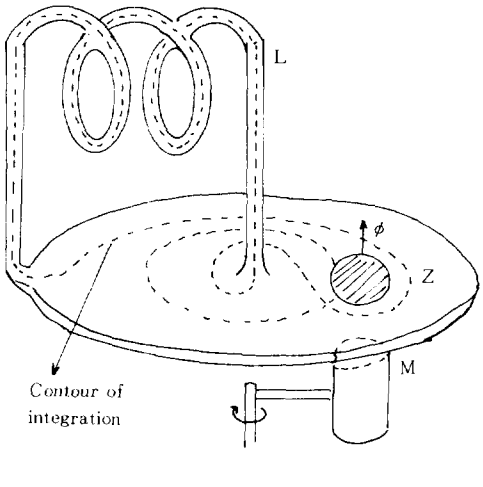

그림 4. Volger의 모델

field)의 힘은 초전도 상태인 Nb foil을 국부적(locally)으로 충분히 정상상태(normal state)로 소멸(quenching)시킬 수 있을만큼의 자계를 발생할 수 있도록 구성되어진다. 여기서 각 자석(magnet pole)의 발산된 자계에 의해서 소멸된 초전도상태 즉 정상상태(Normal state)를 "Normal spot(또는 spot)"이라 설명되어 진다. 그리고 Nb foil원주 둘레를 따라 그림에서 보는 바와 같이 초전도 도체(Superconducting leads)들이 주기적으로 연결되고 초전도 fluxpump의 출력 터미널인 AA'상에 함께 모여진다. 이와같은 형태의 Rotating-spot fluxpump

는 최근 계속 연구중에 있지만[6 7 8 9] 높은 초전류 발생 원인의 정확한 작동이론은 아주 복잡해서 아직은 정확히 이해되지 않고 단지 넓은 각도에서 설명이 되고 있다. 초전도 Rotating-spot Fluxpump의 작동원리를 이해하기 위한 가장 좋은 방법은 초기에 발견된 volger의 모델을[10] 이용하는 것이다. 그림4에서 모여진 바와 같이 Volger의 Fluxpump는 회전할 수 있는 영구자석에서 발산된 자계와 함께 극저온 상태가 되어있는 얇은 초전도 원판(disc)으로 구성되어 진다. 이 모델에서도 회전하는 영구자석에 의해서 발산되는 자계에 의해서 초전도 원판상에 그림에서 보여진 바와 같이 Normal spot이 형성된다. 그림에서 점선 "Z"는 회전하는 Normal spot에 의해서 형성되는 전류경로를 나타낸다. 우선 Volger's Fluxpump의 작동원리를 이해하기 위해서 Type-Ⅰ초전도체의 intermediate-state와 Type-Ⅱ초전도체의 mixed-state를 무시한다. 그러면, 1차원적인 초전도회로(simply-conected-body)에서는 Meissner[1]효과가 존재하는 한 가해진 자계는 초전도체 내부 속으로는 스며들 수가 없고, 2차원적인 초전도회로(Doubly-connected-body)에서는 일단 회로에 쇄교(link)된 자속은 자속보전법칙을 따르게 된다. 그러나 3차원(Triply-connected-body)이상의 초전도회로에서는 구성방법에 따라 여러가지의 예측할 수 없는 경우들이 나타나게 된다. 여기서 중요한 것은 초전도회로의 전기물리적인 특성을 이해하기 위해서는 초전도체가 가지고 있는 그 자체의 특성보다는 오히려 회로를 구성하기 위한 입체적인 형태에 달려 있다는 것이다. 다시 그림4를 보게되면 Volger의 Fluxpump는 Triply-connected-body로 형성된 회로이기 때문에 만약 회전자석이 주위를 두번 회전한다면 회전자석에 의해서 만들어지는 Normal spot은 역시 폐회로로 구성된 초전도회로를 두번 쇄교하게 된다. 예를들어 Normal spot에 의해서 제공되는 총자속이 "ϕ_0"이고 그리고 "n" 번 회전을 한다면 결국 초전도 회로와 쇄교된 총자속은 "$n\phi_0$"가 될 것이다. 그러면 초전도 회로상에서 흐르는 전류는 다음과 같이 쉽게 얻어진다.

$$I=\frac{n\phi_0}{L} \qquad (3)$$

3. 초전도 자속펌핑을 이용한 초전도 교류 발전기의 전망

응용 초전도의 분야 중 특히 초전도 교류발전기의 개념은 여러해 동안 주요연구관심 대상이 되어 왔었다. 이미 미국, 일본, 영국, 불란서 등의 주요 국가들은 수많은 형태의 초전도 교류발전기를 실험제작을 해왔고 최첨단 초전도 기술의 연구발전은 벌써 300MVA의 출력용량을 가질 수 있는 초전도 교류발전기를 제작할 수 있는 단계에 까지 이르렀다.[11] 지금까지 연구제작된 거의 모든 초전도교류발전기의 구조적 특성면에서는 계자권선(Field winding)은 초전도 재료에 의해서 만들어지고 회전될 수 있도록 제작되어지며, 아마츄어(armature)권선은 정상도체(Normal conduct)로 구성되고 계자권선 밖에서 정지상태로 유지되어 진다. 이러한 구조적인 특징은 아마츄어 권선과 계자권선에 흘러들어가는 액체헬륨과 액체질소의 극저온상태를 보호개선시키고 또한 필요로 하는 초전도 재료의 양을 최적화(optimize)시키기 때문에 현재 대부분 사용되는 구조이다.

현재 연구제작된 대부분의 초전도 회전계자 형태의 교류발전기는 계자권선과 여자기(Exciter)의 폐회로를 구성하기 위해 계자권선의 코일들을 슬립링(slip rings)과 브러시(Brush)에 연결(terminate)될 수 있도록 고안되어 진다. 이러한 브러시의 사용은 특히 초전도 교류발전기 사용의 응용면에 있어서 N/S 결합(Normal-Superconducting wires junction)에서 발생하는 큰 열량손실(Thermal losses)로 파급되는 초전도 상태의 자체소멸(Self-quenching)문제때문에 요구되어지는 큰 용량의 저온냉동공급기(Cryogenic supply system)의 설치문제 관계로 큰 단점을 가지고 있었다. 또한 현재 미국의 주요 연구소에서도 진행중인 우주항공분야의 연구과제에서도 자체 비행체 내에서 강한 에너지를 얻기위한 방법으로서 가능하면 가벼운 초전도 교류발전기를 이용하려는 연구가 진행되고 있는 실정이다. 그러한 연구계획을 가능케하는 가장 중요한 방법은 현재 사용되는 초전도 교류발전기의 중량을 더욱 가볍게 제작하는 방법이다. 그러기 위해서는 조금전에 언급된 N/S junction에서 발생되는 열량손실을 제거하는 것이 큰 과제라 할 수 있겠다. 또하나의 Slip-ring사용의 큰 단점은 브러시와의 접촉에서 발생하는 전기잡음(electrical noise)이다.

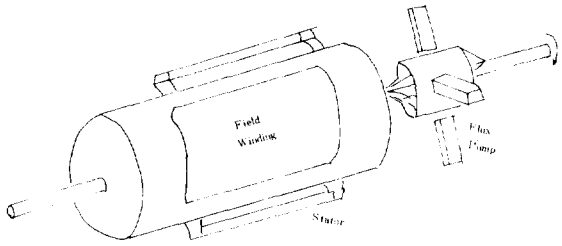

그림 5. 브러시없는 초전도 교류발전기의 구조 특성

이것은 공중에서 현재 사용되는 최첨단장비의 통신망까지도 큰 영향을 주기 때문에 큰 문제로 고려되고 있다.

이러한 여러가지의 주요 이유로 몇년전 브러시없는 초전도 교류발전기(Brushless superconducting AC generator) 의 연구계획이 처음으로 Mowardi[12]에 의해서 고안되었다.

이 새로운 기기는 지금까지 연구제작된 초전도 교류발전기에서 큰 문제로 남아있었던 슬립링과 브러시의 사용을 제거할 수 있다는 가능성에 대해서 큰 의의를 가지고 있고 실제로 소형의 브러시가 없는 초전도 교류발전기가 제작되어 실험작동면에서 큰 성공을 보인 바가 있다.[12) 13) 14)]

그림5는 Mawardi에 의해서 처음 연구고안된 브러시없는 초전도 교류발전기의 대략적인 구조를 보여준다. 그 그림에서 계자권선(Field winding)은 이전에 설명되었던 Rotating-spot Fluxpump의 기본적인 원리에 의해서 충전(energized)되어진다. 그리고 계자권선과 Rotating- spot Fluxpump는 같이 회전될 수 있도록 구성되어지고 초전도 폐회로를 만든다. 초전도 Fluxpump에 의해서 한번 충전된(charged) 계자권선은 영구적인 초전도 전자석으로 작동되어 진다. 여기서 또하나의 중요한 큰 장점은 초전도 계자권선에서 요하는 최고의 초전류가 달성된 후에는 더이상 초전도 Fluxpump을 초전도 회로내에 사용할 필요가 없다는 것이다.

결국 위에서 언급한 바와 같이 초전도 브러시없는 교류발전기에서 가장 중요한 장치(Device)는 초전도 Fluxpump 의 역활이라 할 수 있겠다. 이러한 주요 이유때문에도 여러가지 형태의 초전도 Flumpump중 특히 Rotating-spot Fluxpump에 많은 연구관심이 현재 계속 집중이 되고있는 상황에 있다.

물론 여러가지의 큰 장점들 때문에 최근에 고안된 Rotating- spot Flumpump도 실험상으로 발견된 다음과 같은 몇가지의 주요 문제점들을 가지고 있다.

1) 회전자석에 의해서 초전도 foil상에서 형성되어지는 Normal spot의 와전류(Eddy current)현상.
2) 회전자석의 속도 증가와 함께 감소되는 자속펌핑율의 문제점.
3) 초전류의 증가와 함께 초전도 Fluxpump의 양단에 유기되는 유기기전력의 감소.
4) 시간이 경과함에 따라 유기기전력에 발생하는 전압 변동(Voltage Fluctuations)

위에서 언급한 문제점들을 이해하기 위한 연구가 계속 진행중에 있으며 그중 몇가지는 최근에 발표된[7) 8) 9)] 학회지에서 명백해 졌다.

4 결 론

약 70여년만에 발견된 새로운 초전도 재료의 혁신적인 성공으로 인하여 이제 과학계는 새로운 초전도시대를 맞이 할 수 있겠다고 하겠다. 이미 세계의 주요국가들에 의해서 수십여년 동안 연구되어 왔던 초전도 재료, 그것을 응용한 초전도기기분야와 초전도 에너지 시스템, 그리고 초전도 전자소자응용(Josephson effect), 초전도 기초물리응용 등 초전도 응용면에서는 지금까지는 경제적인 원인때문에 많은 제한을 받고 있었다. 그러나 지금부터는 새로운 혁신적인 재료의 발견으로 인하여 초전도의 응용분야가 아주 넓어지게 되고 1987년 이후 전세계의 많은 국가들이 점차로 초전도 연구과제에 집중 투자하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 단지 이러한 실험적인 연구자료에 의해서만 발견된 새로운 초전도 재료와 그응용면에 있어서, 그것들을 뒷받침할 초전도 이론이 아직까지 체계화되어 있지않다는 것이 또한 큰 연구문제라 할 수 있겠다. 현재 주로 많이 사용되고 있는 TypeⅡ초전도재료인 Nb compound는 어느정도까지는 그 자체의 초전도 발생원리를 BCS이론으로 설명이 될 수 있지만 이번에 발견된 신소재인 세라믹초전도 재료는 현재까지 주로 사용된 BCS이론으로는 전혀 설명할 수 없는 큰 문제를 가지고 있다는 점이다.

그리고 초전도 응용면에 있어서도 앞으로는 초전도 전기기기 전 분야에 걸쳐 연구 집중될 전망으로 보여진다. 특히 초전도 전기기기 응용중 초전도 교류발전기는 10여년이상 계속 많은 연구관심 대상이 되어왔고, 앞으로는 전에 언급된 바와 같이 여러가지의 장점들을 보충한 브러시없는 초전도 교류발전기의 새로운 응용연구가 계속될 것으로 전망되어 진다. 그러기 위해서는 초전도 교류발전기의 핵심을 이루는 초전도 Rotating-spot Fluxpump 의 작동이론을 완전히 이해하기 위한 계속적인 연구가 진행될 것으로 보여진다.

참 고 문 헌

1) T. Duzer C. Turner, "Principles of Superconductive Devices and Circuits", Elsevier, pp. 36-88, 1987

2) Van Beelen, H., et al., "Fluxpumps and Superconducting solenoids", Physica, Vol. 31, pp. 413, 1965

3) M. S. Lubell and S. Wipf, "A Cable-wire Magnet powered by a Fluxpump", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 13, pp. 150, 1968

4) O. K. Mawardi, et al., "Operational characteristics of a Fluxpump", IEEE Transactions on Magnetics, MAG 15, No. 1, pp. 828, Jan. 1979

5) A. C. Rose-Innes, "A Superconducting Magnetic Flux Compresser", Cryogenics, Vol. 13, pp. 103, 1973

6) Taekuk Ko, "Study of the Performance of a Novel Supperconducting Fluxpump", Ph. D. Dissertation, Case Western Reserve University, Oct. 1985

7) Taekuk Ko and O. K. Mawardi, "Current Distribution in a Moring spot Fluxpump", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-23, No. 2, pp. 584, March 1987

8) Taekuk Ko and O. K. Mawardi, "Parametric Representation of a Superconducting High Current Generator", IEEE Transactions on Magnetics(In print), 1988

9) O. K. Mawrdi and S. Xu, "Armature Reaction in a Fluxpump", IEEE Transactions on Magnetics (In Print), 1988

10) J. Volger, et al., "The Prinple and Derformance of a superconducting Dynamo", Cryogenics, Vol. 5, No. 10, pp. 256, 1965

11) W. McCown J. Edmord, "300MVA Superconduеting Generator.. Plan for Design, Testing and long-term Operation", CIGRE, Paris, Sep. 1980, 11-08

12) O. K. Mawardi and A.M. Ferendeci "Fluxpump excited Brushless Alternator", Wright-Patterson Air Force Base Contract(F33615-79C-2038), Sep. 1980

13) O. K. Mawardi, et al., "Brushless Superconducting Generator", Final Technical Research Peport, Air Force Flight Dynamics, June 1982

14) O. K. Mawardi, et al., "Brushless Superconducting Alternators", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-13, No. 1, Jan. 1977