

Development of Prepolarization Coil Current Driver in SQUID Sensor-based Ultra Low-field Magnetic Resonance Apparatuses

S.-m. Hwang, K. Kim^{*}, C. S. Kang, S.-J. Lee, and Y.-H. Lee

Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

(Received 1 November 2011 revised 23 November 2011 accepted 25 November 2011)

SQUID 센서 기반의 극저자장 자기공명 장치를 위한 사전자화코일 전류구동장치 개발

황성민, 김기웅^{*}, 강찬석, 이성주, 이용호

Abstract

SQUID sensor-based ultra low-field magnetic resonance apparatus with μT -level measurement field requires a strong prepolarization magnetic field (B_p) to magnetize its sample and obtain magnetic resonance signal with a high signal-to-noise ratio. This B_p needs to be ramped down very quickly so that it does not interfere with signal acquisition which must take place before the sample magnetization relaxes off. A MOSFET switch-based B_p coil driver has current ramp-down time (t_{rd}) that increases with B_p current, which makes it unsuitable for driving high-field B_p coil made of superconducting material. An energy cycling-type current driver has been developed for such a coil. This driver contains a storage capacitor inside a switch in IGBT-diode bridge configuration, which can manipulate how the capacitor is connected between the B_p coil and its current source. The implemented circuit with 1.2 kV-tolerant devices was capable of driving 32 A current into a thick copper-wire solenoid B_p coil with a 182 mm inner diameter, 0.23 H inductance, and 5.4 mT/A magnetic field-to-current ratio. The measured t_{rd} was 7.6 ms with a 160 μF storage capacitor. t_{rd} was dependent only on the inductance of the coil and the capacitance of the driver capacitor. This driver is scalable to significantly higher current of superconducting B_p coils without the t_{rd} becoming unacceptably long with higher B_p current.

Keywords : Magnetic resonance, MRI, NMR, Pre-polarization, Current driver, IGBT, Capacitor bank

I. Introduction

극저자장 자기공명 장치는 기존 고자장 자기

공명에 필요한 수 T의 강한 주 자기장 (B_0) 대신 수 μT 의 미약한 측정 자기장(B_m)을 이용해서 자기공명신호를 취득하는 장치이다. 기존 고자장 자기공명장치에 쓰이는 유도코일 센서 대신 초전도 양자 간섭장치(SQUID) 센서를 사용하여 이러한 미약한 B_m 으로 생성되는 자

^{*}Corresponding author. Fax : +82 42 868 5290
e-mail : kwkim@kriss.re.kr

기공명신호의 측정이 가능하다 [1]. 이렇게 미약한 B_m 은 다음과 같은 극저자장 자기공명 장치의 여러가지 다양한 장점의 기반이 되는데 그 장점은 다음을 포함한다: 미약한 B_m 에 기인한 장치의 단순화, 광범위한 B_m 의 조정 가능성, 강한 자기장에 의한 금속 보철물에 의한 신호 및 영상의 왜곡 배제, 강한 자기장에 의한 화학적 공명점 변위 없음, 자연 선풍에 준하게 또는 그 보다 낮게 좁은 비균질 선풍 등 [1-3] 고자장 자기공명 장치의 B_0 는 Larmor 주파수에 해당하는 자기공명 신호를 생성하는 것과 동시에 이러한 자기공명 신호의 크기도 결정한다. 반면에 미약한 측정 자기장을 사용하는 극저자장 자기공명 장치의 경우는 B_m 만 가하는 경우 자기공명 신호의 크기 또한 미약할 수 밖에 없으므로 신호를 측정하기 전에 추가적으로 사전자화 자기장(B_p)을 통해 샘플을 강하게 자화시키는 단계를 거친다. 이러한 경우 자기공명 신호의 크기는 샘플의 자화도에 비례하므로 B_p 는 강할수록 좋다. 반면에 강한 B_p 는 자기공명 신호의 측정을 방해하기 때문에 자기공명 신호의 측정 전에 이 B_p 는 완전히 사라져야 하며 B_p 가 사라지는 동안에도 샘플의 자화는 이완되기 시작하므로 B_p 가 사라지는 속도는 일반적으로 샘플의 자성이 이완되는 1 초 내외 보다 훨씬 짧아야 한다 [1].

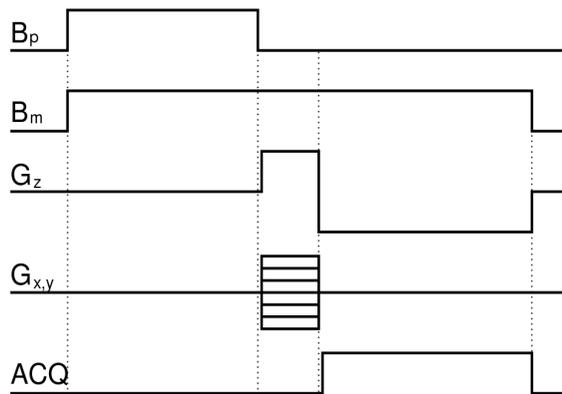


Fig. 1. A pulse sequence example (gradient echo) for ultra low-field MRI system. The prepolarization field (B_p) turns on with the measurement field (B_m). After B_p turns off, the gradient fields (G_x , G_y , G_z) turn on. After G_x , G_y turn off and G_z flips, the magnetic resonance signal is acquired (ACQ). B_m is turned on until the signal acquisition ends.

Fig. 1은 극저자장 자기공명 장치의 작동에 필요한 자기장의 한 적용 예를 보여준다.

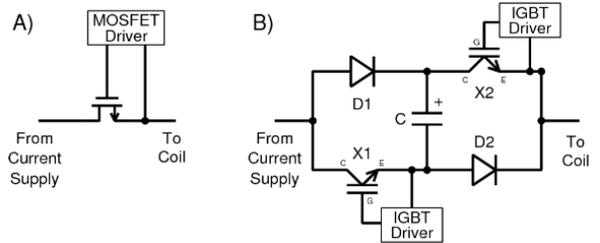


Fig. 2. B_p coil driving methods. (A) Dissipative MOSFET switch (B) Energy recycling switch with a storage capacitor in an IGBT-diode bridge switch.

이러한 사전자화 자기장을 생성하는 B_p 코일에 전류를 공급하는 B_p 코일 구동장치는 일반적으로 MOSFET(Metal-Oxide Silicon Field- Effect Transistor) 소자를 이용하는데 (Fig. 2A) 이 MOSFET 소자는 전류 공급장치와 B_p 코일 사이에서 전류의 스위치 역할을 해서 소자가 켜지면 B_p 코일에 전류가 공급되어 B_p 가 생성되며 소자가 꺼질 때 B_p 코일에 흐르던 전류를 차단한다. 전류가 공급될 때는 B_p 코일의 인덕턴스 L_p 와 B_p 코일 및 구동장치의 저항 R 에 의해 전류증가시간 $\tau_{ru} = L_p/R$ 이 결정되고 전류가 차단될 때는 MOSFET 소자의 avalanche breakdown을 통해 B_p 코일의 자기유도에너지가 열로 소모되며 전류감소시간은 아래와 같이 된다.

$$\tau_{rd} = L_p I_0 / (V_{br} - V_s)$$

여기에서 I_0 는 B_p 코일에 흐르던 전류, V_{br} 은 MOSFET 소자의 내압, V_s 는 전류공급전압이다 [4]. 위의 수식과 같이 B_p 코일에 흐르는 전류가 증가할수록 전류감소시간은 길어지며 전류감소시간을 짧게 하기 위해서는 내압이 높은 MOSFET 소자를 쓰거나 다수의 MOSFET 소자를 직렬로 연결해야 한다. 저항선재를 사용하는 B_p 코일은 선재의 발열 때문에 근본적으로 공급할 수 있는 전류에 제한이 있지만 초전도 선재를 사용하는 B_p 코일의 경우 이런 제한이 없어진다. 그러나 MOSFET 소자를 이용한 B_p

전류구동장치를 사용하면 전류감소시간과 구동하는 전류량 사이의 상관관계가 공급전류를 늘리는데 제한요소가 되어 이러한 초전도 B_p 코일에 높은 전류를 공급하기 어렵다.

반면에 B_p 코일의 자기유도에너지를 열로 소비하지 않고 대용량 커패시터에 충전하는 방식을 사용하면 자기유도 에너지가 열로 소모되지 않고 다음 번 B_p 코일에 전류를 구동할 때 다시 사용할 수 있으며 무엇보다 전류감소시간도 B_p 코일과 커패시터가 형성하는 LC회로의 진동 주기로 결정되어 전류감소시간이 B_p 코일에 흐르는 전류에 영향을 받지 않는다. 또한 전류증가시간도 전류 감소 시간과 마찬가지로 짧게 되어 MOSFET 소자를 사용할때의 LR회로의 시상수 $\tau_{LR} = (L_p/R) = 0.38 s$ 에 의해 결정되는 전류 증가 시간보다 월등히 짧아 자기공명 신호를 얻는데 필요한 시간을 그 만큼 줄일 수 있다.

본 논문에서는 위와 같이 커패시터와 IGBT 스위치를 사용한 사전자화 코일 구동기의 설계를 설명하고 제작한 구동기의 특성을 평가해보았다.

II. Design

사전자화 코일 구동기로 전류를 공급할 B_p 코일은 내경이 182 mm, 외경이 270 mm이며 높이는 130 mm인 두꺼운 솔레노이드 형태로 코일의 중심에 1 A 당 5.4 mT의 자기장을 생성한다. 이 코일의 인덕턴스는 0.23 H이고 전기저항은 실온에서 4.9 Ω 이었다. 실제 구동은 액체 질소가 담겨있는 저온듀아 속에서 이루어지며 이 온도(77 K)에서는 전기저항이 0.59 Ω 이었다.

이러한 B_p 코일에 전류를 공급하고 차단하는 구동기 회로는 Fig. 2B와 같다 [5]. 반도체 스위치 X1, X2와 다이오드 D1, D2로 이루어진 브릿지 스위치가 전류공급기와 B_p 코일 사이에 커패시터 C가 연결되어 전류가 흐르는 경로를 변경하는 요소가 된다. 전류의 경로는 스위치의 작동 여부와 전류의 유무에 따라 네 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 ‘방전’ 상태로 먼저 B_p 코일의 자기유도에너지에 의해 충전된 C가

D1과 D2에 역 바이어스를 걸어 이들 다이오드를 통해서는 전류가 흐르지 못하는 상태에서 X1과 X2가 켜져 X1, C, X2 순으로 전류가 흐르게 되고 이에 따라 C에 충전된 에너지가 B_p 코일로 방전되며 전류가 증가하는 상태이다.

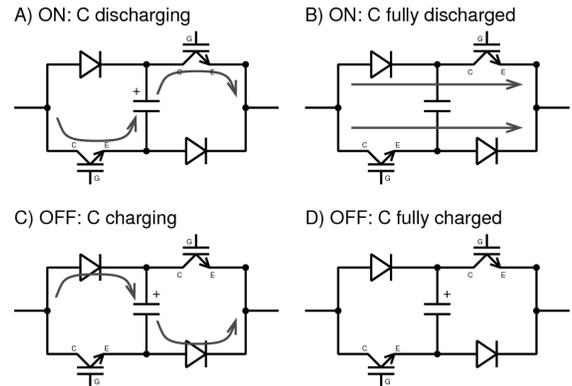


Fig. 3. Operation of energy recycling B_p coil driver. (A) Discharging, (B) Fully discharged, steady current flow, (C) Charging, and (D) Fully charged, no current flow.

(Fig. 3A) 두번째는 ‘통전’ 상태로 C가 모두 방전되어 D1과 D2에 걸렸던 역 바이어스가 풀리면서 전류공급기의 전류가 D1과 X2, 그리고 D2와 X1을 통해서 바로 B_p 코일로 연결된 상태이다. 이때 C를 통해서는 전류가 흐르지 않는다. (Fig. 3B) 세번째는 ‘충전’ 상태로 X1과 X2가 꺼지면서 B_p 코일의 자기유도에너지가 D1과 D2를 통해 C에 충전되면서 전류가 감소하는 상태이다. (Fig. 3C) 마지막으로 네번째는 ‘휴지’ 상태로 B_p 코일의 자기유도에너지가 모두 C에 충전되어 소진된 상태로 D1과 D2에는 역 바이어스가 걸리고 X1과 X2는 꺼져 있어서 전류가 흐르지 않는 상태이다. (Fig. 3D) 이러한 ‘휴지’ 상태에서 X1과 X2가 켜지면 처음의 ‘방전’ 상태로 돌아가게 된다.

B_p 코일 및 구동기의 내부 저항을 무시한다면, ‘충전’ 및 ‘방전’ 시 전류의 증가 및 감소 시간은 B_p 코일과 C가 형성하는 LC회로의 고유주기의 1/4로 아래와 같이 결정된다 [5].

$$\tau_{ru} = \tau_{rd} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_p C}$$

그리고 C의 충전과 방전 시 C를 비롯해 스위치 X1과 X2, 다이오드 D1과 D2는 B_p 코일과 C가 형성하는 LC회로의 진동에서 형성되는 높은 전압을 견딜 수 있어야 한다. 각 소자에 인가될 수 있는 최대 전압은 B_p 코일의 유도기 전력 관계인 $V = L \frac{dI}{dt}$ 에서 계산하여 전류공급기의 전압을 더하면 아래와 같다 [5].

$$V_{C \max} = V_S + I_0 \sqrt{\frac{L_p}{C}}$$

B_p 코일 구동기에 사용하는 소자 중 반도체 스위치 X1과 X2는 1.2 kV 내압과 600 A 전류 용량을 가지는 IGBT(Insulated-Gate Bipolar Transistor) CM600HA-24A(Powerex Inc)를 사용했으며 다이오드 D1과 D2는 1.6 kV 내압과 160 A 전류 용량을 가지는 CS611616B(Powerex Inc.)를 사용했다. 충전용 커패시터 C로는 1.2 kV 내압과 320 μF (+ 10 %) 용량을 가지는 947C321K12CDM(Cornell Dublier) 두개를 직렬 연결하고 각각의 양단에 1 M Ω 전압분배 저항을 병렬로 부착하여 총 2.0 kV 내압과 160 μF 용량의 커패시터 뱅크를 만들어 사용했다. 여기에서 예상되는 전류의 증가 및 감소시간은 9.5 ms이며 각각 소자에 최대 1.2 kV 전압이 걸릴 수 있다고 가정할 때 B_p 코일에 최대 32 A의 전류를 구동해서 0.17 mT의 B_p 를 생성할 수 있다.

반도체 스위칭 소자인 IGBT와 다이오드는 기계적 스위치와 달리 소자 자체의 특성상 미량의 누설전류가 있다. Fig. 2B와 같은 회로를 실제로 구성해 B_p 코일을 구동해 보면 IGBT가 꺼지고 커패시터가 완전히 충전되어 B_p 코일에 전류가 흐르지 말아야 할 경우에도 30 μA 정도의 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 상기 누설 전류는 B_p 코일 내부에 150 nT 정도의 자기장을 생성하기 때문에 그대로는 정상적인 자기공명 신호를 측정할 수 없다. 이러한 누설 전류를 방지하기 위하여 구동기에서 B_p 코일로 전류를 공급하는 연결단자 양단에 기계 접점식 릴레이(G9EA-1-B-CA, Omron)를 각각 연결해 B_p 코일의 자기유도에너지가 모두 커패시터로 충전된 이후 구동기와 B_p 코일 사이의

모든 전기적 연결을 제거했다. 이로서 누설전류를 차단하는 것과 동시에 구동기에서 B_p 코일로 흘러들 수 있는 모든 전기적 잡음의 유입 가능성도 차단했다(Fig. 4).

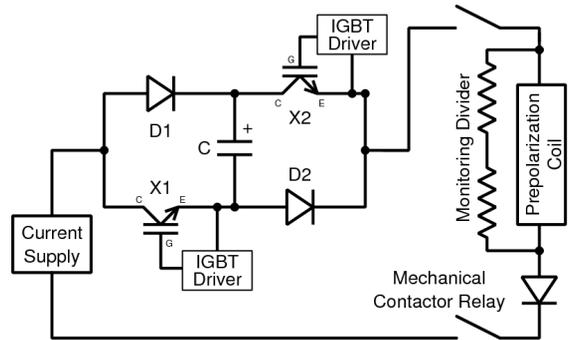


Fig. 4. B_p coil driver circuit diagram.



Fig. 5. Inside of the built B_p coil driver.

추가적으로 구동기를 통해 B_p 코일로 기계적 접점 릴레이로도 완전히 막을 수 없는 고주파 잡음이 유입되는 것을 막기 위해 전류공급기에서 B_p 코일 구동기로 공급되는 전류는 DC 라인필터(D2L75F, Filter Concepts)로 고주파 성분을 걸러내었고 구동기 외부에서 입력되는 IGBT 및 릴레이 트리거 신호는 광섬유 입력으로 받아 이를 통한 외부의 잡음 유입을 원천적으로 차단했다. IGBT 소자를 켜고 끄는데 필요한 IGBT 게이트 구동부는 고주파 잡음을 유발할 수 있는 DC-DC 변환기를 사용하지 않고 독립적인 전지 전원을 가지고 입력부에 optoisolator를 사용한 구동회로를 제작해 사용했다.

B_p 코일 구동기의 전체 전원 역시 마찬가지로 이 유로 리튬이온폴리머 축전지를 내장해 사용했다. Fig. 5는 완성된 B_p 코일 구동기의 내부이다.

III. Evaluation

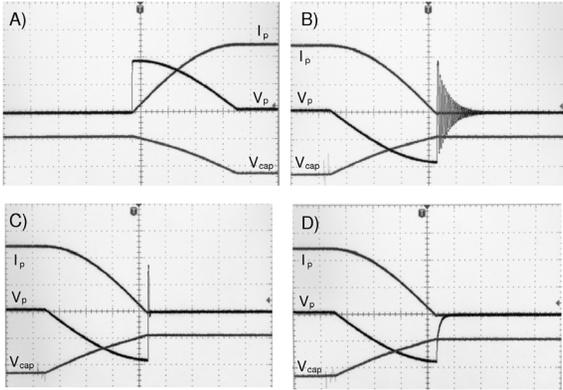


Fig. 6. Operation transients of the built B_p coil driver. (A) Switch ON, (B) Switch OFF, (C) Switch OFF with a 5 k Ω damping resistor, and (D) Switch OFF with a 1 k Ω damping resistor. I_p indicates current through the B_p coil, V_p indicates voltage across the B_p coil, and V_{cap} indicates voltage across the storage cap.

Fig. 6A는 커패시터 C가 이미 충전되어 있는 ‘휴지’ 상태에서 IGBT X1과 X2를 켜 ‘방전’ 상태를 통해 ‘통전’ 상태로 갈 때의 반응이다. 전류공급기의 전압 $V_s = 10\text{ V}$ 로 B_p 코일에 12 A의 전류가 흐르도록 했다. IGBT가 켜지는 순간 B_p 코일 양단에 충전된 커패시터의 전압이 인가되면서 전류가 빠르게 증가한다. Fig. 5B는 ‘통전’ 상태에서 IGBT X1과 X2를 꺼 ‘충전’ 상태를 통해 ‘휴지’ 상태로 갈 때의 반응이다. IGBT가 꺼지면서 전류가 줄어드는 만큼 B_p 코일 양단에 자기유도기전력이 발생하고 이것이 커패시터 양단에 인가되면서 커패시터를 충전한다. 커패시터가 충전 및 방전되는데 걸린 시간은 각각 7.4 ms, 7.6 ms로 예상했던 9.5 ms 보다 조금 짧게 형성이 되었다. 이 측정값은 코일에 5 A, 20 A 등의 전류를 흘려줄 때에도 동일하게 유지 되었다. ‘충전’ 과 ‘방전’ 상태에서 B_p 코일 양단에 걸리는 전압의 최대값은 450 V로 $I_0 = 12\text{ A}$ 인 경우의 아래와 같은 예상 값

과 근사하다.

$$V_{C_{\max}} = V_s + I_0 \sqrt{L_p/C} = 10\text{ V} + 453\text{ V} = 463\text{ V}$$

Fig. 6B에서 커패시터가 완전히 충전된 직후 약 4 ms 간 나타나는 감쇠진동 현상은 B_p 코일의 기생 커패시턴스에 의해 형성되는 병렬 LC 회로에 의한 것이다. 이를 없애기 위해서는 감쇠진동이 아닌 임계감쇠 또는 약간의 과잉감쇠 상태가 되도록 감쇠저항을 하나 추가, 병렬로 연결해 병렬 LCR 회로를 만들어야 한다. Fig. 6C는 5 k Ω 의 감쇠저항을 연결했을 때의 양상으로 아직 감쇠진동이 조금 남아있다. Fig. 6D는 1 k Ω 의 감쇠저항을 연결했을 때의 양상으로 감쇠진동은 사라지고 약 1 ms 정도의 시상수를 가지는 과잉감쇠 상태가 되었다.

IV. Discussion and Summary

이상 대용량 커패시터와 IGBT-다이오드 브리지 스위치를 응용한 에너지 재활용 방식의 B_p 코일 구동기의 설계, 제작 그리고 성능 평가를 했다. 이 에너지 재활용 방식의 구동기는 대량의 전류를 B_p 코일에 흘려 주더라도 공급하는 전류 량에 따라 전류 감쇠 시간이 증가하지 않는다. 또한 B_p 가 켜질 때의 전류 증가 시간도 역시 짧아 반복적인 자기공명신호 취득에 걸리는 시간을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 제작 된 구동기는 설계 시 성능 기대치를 모두 만족했으며 릴레이 차단 시 자기차폐실 내부에서 SQUID 센서의 동작에 거의 영향을 주지 않을 정도로 잡음도 적었다.

제작에 사용된 소자들 중 가장 내압이 작은 1.2 kV를 기준으로 B_p 코일에 최대 32 A의 전류를 흘려 0.17 T의 B_p 를 생성할 수 있다. 현재 상용화된 제품으로 가장 높은 6.5 kV의 내압을 가지는 소자들을 사용 한다면 최대 172 A의 전류를 흘려줘 0.93 T의 B_p 를 생성할 수 있을 것이다. 이 정도로 강한 B_p 를 생성하려면 B_p 코일을 저항선재로 하는 데는 한계가 있어 초전도체 선재로 구성하는 것을 검토해야 한다. 50 Hz 내지 60 Hz의 교류 전류의 송전과 핵융합

로 토카막, 입자 가속기에 사용하는 전자석 제작을 위한 낮은 교류발열의 초전도체는 이미 충분히 개발되어있기 때문에 [6] 초전도체 선재를 사용한 B_p 코일에 기술적인 문제는 코일 자체 보다는 전류 구동기의 성능이 된다.

이렇게 강한 전류로 B_p 코일을 구동한다면 MOSFET 스위치를 이용한 B_p 코일 구동 방법으로 전류감소시간이 충분히 짧도록 만들기 위해서는 전류가 차단될 때 지나치게 높은 전압이 형성되므로 내압이 높은 스위치 소자를 다수 직렬로 연결해야 해서 구동기의 설계가 복잡해지고 또한 전류 차단 시 발열이 커져 실용성이 떨어지게 된다. 그러므로 커패시터를 이용한 에너지 재활용 방식을 사용하는 이용한 B_p 코일 구동장치는 이에 대한 훌륭한 대안이 될 것이다.

References

- [1] John Clarke, Michael Hatridge, and Michael Moßle, "SQUID-Detected Magnetic Resonance Imaging in Microtesla Fields", *Annu. Rev. Biomed. Eng.* **9**, 389-413 (2007).
- [2] Seung Kyun Lee, Michael Moßle, Whittier Myers, Nathan Kelso, Andreas H. Trabesinger, Alexander Pines, and John Clarke, "SQUID-Detected MRI at 132 μ T with T1-Weighted Contrast Established at 10 μ T–300 mT", *Magn. Reson. in Med.* **53**, 9-14 (2005).
- [3] Robert McDermot, SeungKyun Lee, Bennie ten Haken, Andreas H. Trabesinger, Alexander Pines, and John Clarke, "Microtesla MRI with a superconducting quantum interference device", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **101**(21), 7857-7861 (2004).
- [4] Vadim S. Zotev, Andrei N. Matlashov, Petr L. Volegov, Algis V. Urbaitis, Michelle A. Espy, and Robert H. Kraus, Jr, "SQUID-based instrumentation for ultra-low-field MRI", *Supercond. Sci. Tech.* **20**(11) S367 (2007).
- [5] Nathaniel I. Matter, Greig C. Scott, Thomas Grafendorfer, Albert Macovski, and Steven M. Conolly, "Rapid Polarizing Field Cycling in Magnetic Resonance Imaging", *IEEE Trans. Med. Imag.* **25**(1), 84-93 (2006).
- [6] Martin N. Wilson, "NbTi superconductors with low ac loss: A review", *Cryogenics* **48**, 381-395 (2008).