

Experiment of harmonic components in voltage on high temperature superconducting wire carrying an AC

Jiho Lee and Tae Kuk Ko*

Yonsei University, Seoul, Korea

(Received 7 February 2013; revised 20 March 2013; accepted 21 March 2013)

Abstract

This paper deals with harmonic components of the voltage on high temperature superconducting wire carrying an alternating current. HTS wire is used to manufacture superconducting power applications carrying an alternating current. Typically, international standard, IEC 61788-3 is used for critical current measurement. Thus, it is not ideal that critical current criteria in dc are adapted to superconducting power devices to decide the operating current of the devices. In this paper, we confirmed odd harmonic voltage on HTS wires carrying an AC. The ratio between harmonic components and fundamental component can be significant clues to decide the critical current criteria for HTS wire and its power applications in AC circumstance.

Keywords : Critical current criterion, operating current, alternating current, harmonic voltage, high temperature superconducting wire

1. 서 론

고온 초전도 선재 (high temperature superconducting wire)로 구성되는 초전도 한류기(superconducting fault current limiter)와 초전도 전력 케이블(high temperature superconducting power cable), 초전도 변압기 (superconducting transformer) 등의 운전 전류를 결정하는 가장 중요 기준은 고온 초전도 선재의 임계전류, I_c 이다 [1] - [2]. 고온 초전도 선재의 임계전류는 직류 환경에서의 임계전류 측정의 국제 기준, IEC 61788-3에 의해서 전계가 $1 \mu V/cm$ 일 때의 전류 값으로 결정된다. 그러나 대부분의 고온 초전도 전력기기는 교류 환경에서 동작한다. 그러므로 직류 환경에서 측정된 임계전류를 교류 환경에서 동작하는 전력기기에 적용함에 있어서는, 사용되는 고온 초전도 선재의 교류 손실과 기기 전체의 교류 손실, 냉각 손실 등을 고려해야 한다 [1] - [2]. 본 논문의 저자들의 기존의 논문에서는 유추에 의한 방법으로 $1 mV_{peak}/cm$ 를 AC 환경에서 초전도 선재의 임계전류 기준으로 제시하였다 [3]. 그러나 초전도 선의 재질, 초전도 기기의 구조에 의해서 발생하는 전압과 전계는 달라질 수 있으므로, 기존의 방법은 일반적으로 적용될 수 있는 방법은 아니다. 본 논문에서는 교류 통전 시 초전도 선재에 발생하는 고조파 성분을 교류환경에서 사용되는 고온 초전도 전력기기의 임계전류를 정하는 기준으로써 제시하고자, 이에 대한 실험 및 분석을 진행한다.

고조파 성분의 전압이 발생하는 것은 Charles P Bean에 의하여 밝혀졌다 [4]. 이 사실에 근거하여 설명된 고조파 성분의 전압을 측정하여 초전도 벌크와 초전도 박막의 임계전류 밀도를 비파괴적으로 측정할 수 있는 the third harmonic voltage method가 사용되어 오고 있다 [5] - [6]. 따라서 외부의 교번자계에 의해 발생하는 유도전류가 고조파 전압을 발생하는 것과 유사하게, 교류 전류를 통전하고 있는 고온 초전도 선재에도 교번자기자계(alternating self-field)에 의해서 고조파 전압이 발생함을 유추할 수 있다. 제2종 초전도체로 구성된 원형 고온 초전도 선재의 경우, 이러한 고조파 전압의 발생에 대해서는 이미 이론적으로 설명이 되어있다 [7]. 본 논문에서는 최근 초전도 전력기기 및 응용에 흔하게 사용되는 테이프 형태의 고온 초전도 선재를 이용하여 실험을 진행한다. 그림 1의 (a)와 (b)는 임계전류가 113 A인 고온 초전도 선에 각각 진폭이 $100 A_{peak}$, $160 A_{peak}$ 인 60 Hz 교류 전류를 통전했을 때 발생하는 전압을 분석하여, 4000 Hz의 sampling rate에서 FFT를 이용하여 0~2000 Hz 구간을 관찰한 주파수 스펙트럼이다. 임계전류 보다 낮은 $100 A_{peak}$ 의 교류전류를 통전할 때에는 3차 이상의 고조파 성분이 제1 고조파 성분인 60 Hz의 전압보다 상대적으로 작은 값이지만, 임계전류 보다 높은 $160 A_{peak}$ 의 교류전류를 통전할 때에는 3차 이상의 고조파 성분이 상대적으로 큰 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

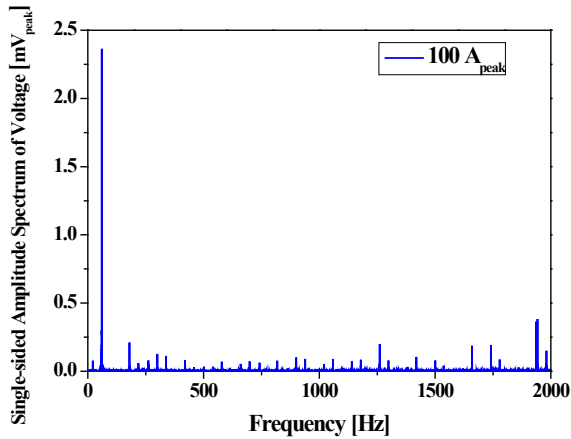
2. 교류 전류를 통전하는 고온 초전도체의 고조파 전압 성분

외부의 교번자계 (alternating magnetic field)가 초전도 벌크에 발생시키는 유도 전류에 의하여 2차 코일에

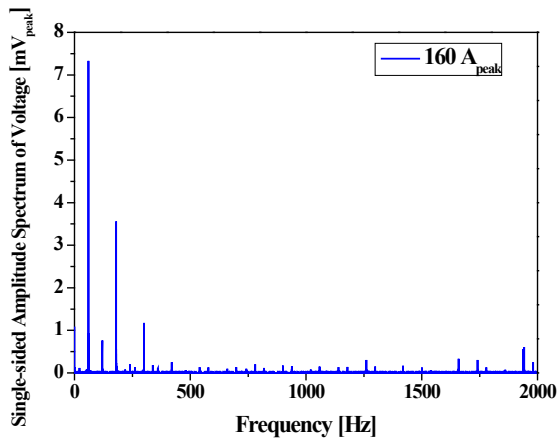
TABLE I
SPECIFICATIONS OF HTS WIRES.

	Tape A	Tape B
Conductor	YBCO	BSCCO
$I_c, 77 K @ self-field$	113 A	136 A
Width	4.8 mm	4.15 mm
Thickness	0.20 mm	0.25 mm
Length of voltage tap	10 cm	

* Corresponding author: tkko@yonsei.ac.kr

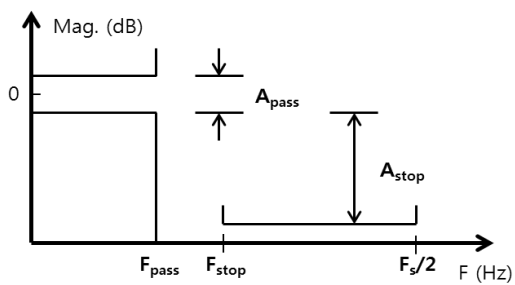


(a)

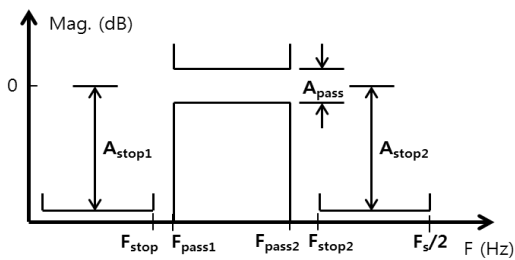


(b)

Fig. 1. Single-sided amplitude spectra of voltage in YBCO HTS wire, when frequency is 60 Hz. (a) $I_0=100 A_{peak}$, (b) $I_0=160 A_{peak}$.



(a)



(b)

Fig. 2. Design parameters of (a) FIR low-pass filter and (b) band-pass filter.

TABLE II
SPECIFICATIONS OF FIR LOW-PASS FILTER TO FILTER INTO
FUNDAMENTAL FREQUENCY VOLTAGE.

FIR Low-pass filter		
Transport frequency [Hz]	50	60
Sampling frequency [Hz]	4000	
Pass frequency [Hz]	60	100
Stop frequency [Hz]	80	140
Pass magnitude [dB]	1	
Stop magnitude [dB]	80	
Filter order	506	253

TABLE III
SPECIFICATIONS OF FIR BAND-PASS FILTER TO FILTER INTO THIRD
HARMONIC VOLTAGE.

FIR Band-pass filter		
Transport frequency [Hz]	50	60
Sampling frequency [Hz]	4000	
Stop frequency1 [Hz]	100	100
Pass frequency1 [Hz]	120	140
Pass frequency2 [Hz]	180	220
Stop frequency2 [Hz]	200	260
Stop magnitude [dB]	1	
Pass magnitude [dB]	80	
Filter order	506	253

본 논문에서는 이와 같은 사실을 이용하여, 고온 초전도 선재에 교류 전류를 통전할 때 발생하는 고조파 전압을 측정하고, 이를 교류 환경에서의 초전도 선재의 임계전류 기준을 예측하는데 중요한 요소로 제시하고자 한다.

3. 실험

3.1. 실험 환경

본 연구에서 사용된 선재는 YBCO와 BSCCO 고온 초전도 선재이다. 선재 별 각각의 사양은 표 I과 같다. 실험에 앞서 액체질소에 담긴 각 시료의 임계전류를 측정하였으며, 각각의 선재에는 전류의 peak 값으로 $1 A_{peak}$ 부터 측정된 임계전류의 $1.5I_C$ 와 $2.5I_C$ 까지 $1 A_{peak}$ 간격으로 진폭을 증가시키며 교류전류를 통전하였다. 선재 시료의 길이는 30 cm, 전압 탭의 길이는 10 cm이며, 외부 자장과 노이즈에 의한 자장의 영향을 줄이기 위해, 전압 신호선과 선재에 의한 loop가 최소화 되도록 전압 신호선을 배치하였다. 통전하는 교류 전류의 최대 값은 통전 시 선재의 과단이 발생하기 직전의 값이다. 실험에서 통전한 교류 주파수는 전력계통에서 일반적으로 많이 사용되는 50 Hz와 60 Hz이다. 교류 통전 시, 초전도 선재에 발생하는 고조파 성분의 전압을 여과 하기 위해서 본 연구에서는 MATLAB을 통해서 제작된 finite impulse response (FIR) low-pass filter (LPF)와 band-pass filter (BPF)를 사용하였다. Infinite impulse response (IIR) filter의 경우, FIR filter에 비해 구조가 복잡하고 비선형적인 위상으로 왜곡에 약하지만, 아날로그 필터의 구조와 비슷하고, 필터의 계수가 적게 필요하므로 아날로그 필터로 변환이 유리하다. 본 연구에서는 실험 종료 후 디지털 필터로 분석을 하였고, 이에 따라 IIR filter에 비해 안정성이 보장되고, 왜곡을 피할 수 있는 FIR filter를 이용하였다. 사용된 LPF와 BPF의 주파수 대역은 초전도

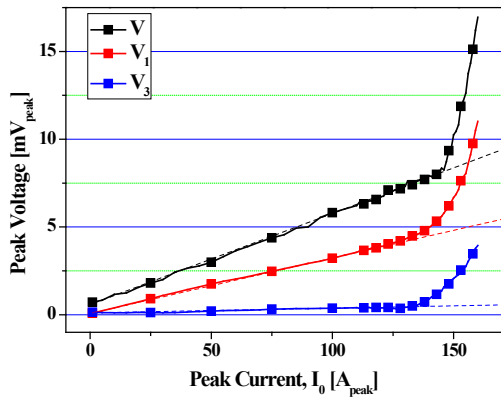


Fig. 3. I_0 - V , V_1 , V_3 curves of Tape A, $f=60$ Hz (dash lines are extension of linear period of V , V_1 , and V_3)

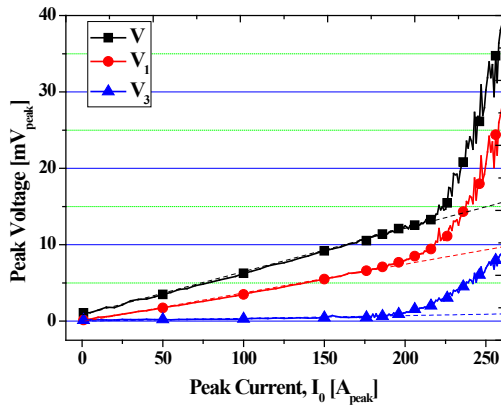


Fig. 4. I_0 - V , V_1 , V_3 curves of Tape B, $f=60$ Hz (dash lines are extension of linear period of V , V_1 , and V_3).

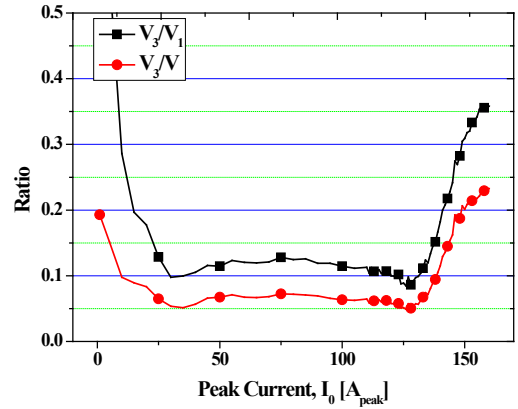
TABLE IV
THE ONSET POINT OF ' I_0 - V , V_1 , AND V_3 ' OF TAPE A AND B, WHEN $F = 50$ HZ.

	Tape A	Tape B
V	146 A_{peak}	225 A_{peak}
V_1	129 A_{peak}	222 A_{peak}
V_3	129 A_{peak}	204 A_{peak}
V_3/V_1	127 A_{peak}	160 A_{peak}
V_3/V	128 A_{peak}	160 A_{peak}

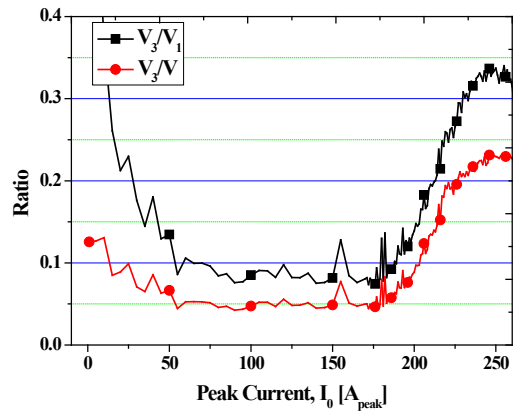
TABLE V
THE ONSET POINT OF ' I_0 - V , V_1 , AND V_3 ' OF TAPE A AND B, WHEN $F = 60$ HZ.

	Tape A	Tape B
V	146 A_{peak}	216 A_{peak}
V_1	130 A_{peak}	196 A_{peak}
V_3	134 A_{peak}	196 A_{peak}
V_3/V_1	127 A_{peak}	176 A_{peak}
V_3/V	127 A_{peak}	176 A_{peak}

선재에 발생하는 고조파 성분을 걸러내기 위해서 각각 제 1고조파 전압과 제 3 고조파 전압을 추출하기에 절하도록 설정되었다. LPF와 BPF의 주파수 대역은 표 II와 표 III와 같다. 그림 2는 표 II와 표 III의 FIR filter의 사양에 대한 설명이다. Stop frequency와 pass frequency는 LPF와 BPF의 stop-band와 pass-band를 설정하기 위한



(a)



(b)

Fig. 5. ' I_0 - V_3/V_1 , V_3/V ' curves of (a) tape A and (b) tape B.

주파수이며, pass magnitude와 stop magnitude는 그때 주파수 도메인의 magnitude이다. 본 연구에서는 그림 2와 표 II에 나열된 사양대로 MATLAB의 filter design and analysis tool을 이용하여 FIR filter를 구성하였다.

3.2 실험 결과 및 분석

초전도 선에 통전되는 교류전류가 증가할 때, 발생하는 고조파 성분 전압을 선재 별로 비교하기 위하여, $I_0 - \cos(2\pi ft)$ 의 교류전류를 초전도 선에 통전하였다. 실험에서는 I_0 을 1 A_{peak} 씩 증가시켜감에 따른 각각의 선재에 발생하는 전압과 FIR filter에 의해 추출된 제1 고조파 전압과 제3 고조파 전압을 계측 및 비교하였다. 본 논문에서는 편의상 이 전압들을 각각 V 와 V_1 , V_3 로 지칭한다. 본 논문에서는 저항성 전압과 유도성 전압을 모두 포함한 상태에서 onset point를 관찰하였다. 이는 통전하는 교류전류가 증가함에 따라 유도성 전압 성분은 선형적으로 증가하고, 저항성 전압성분은 비선형적으로 증가하므로, 저항성 전압과 유도성 전압을 모두 포함하여도 저항성 전압의 비선형적인 증가를 관찰할 수 있기 때문이다. 그림 3과 그림 4는 60 Hz의 교류 전류 통전 시, 각각 Tape A와 Tape B 선재의 I_0 - V , V_1 , V_3 그래프를 나타낸다. 그림 3과 4에서 공통적으로 초전도 선재의 전압, V 의 onset point가 나타나는 시점에서의 I_0 값이 고조파 성분인 V_1 과 V_3 이 나타나는 시점에서의 I_0 값 보다 더 크다. 표 IV는 I_0 - V , V_1 , V_3 그래프의 급격한 상승을 보이는 점, onset point 들이다. 이 onset point들은 그림 3과 그림 4에 각각의 선형 구간의 연장선과 실제 값이 만나는 점을 기준으로 산출하였다. 이

값들을 비교해 보면 V_1 과 V_3 의 onset point가 V 의 onset point보다 더 낮은 I_0 값에서 발생하고 있다. 이 onset point 들을 보다 명확하게 비교하기 위하여 V_3/V_1 과 V_3/V 를 비교하였다. 그림 5의 (a)와 (b)는 tape A와 B의 I_0-V_3/V_1 , V_3/V 그래프를 나타낸다. 두 선재 모두 공통적으로 V_3/V_1 과 V_3/V 의 onset point가 각각의 V_1 , V_3 의 onset point와 거의 같은 통전 전류의 진폭, I_0 에서 나타난다. I_0 가 약 50 A_{peak} 이하인 부분에서 V_3/V_1 과 V_3/V 의 값들이 감소하는 것은 실험에 사용된 power supply가 낮은 진폭의 교류 전류를 발생시킬 때, 정확한 정현파를 발생시키지 못해서 발생하는 오류로 보인다.

초전도 선재에 발생하는 전압과 그것을 필터링한 신호들을 보면, V_3 와 V_1 그리고 V_3/V_1 과 V_3/V 의 onset point는 전압신호, V 의 onset point 보다 더 낮은 I_0 값에서 발생한다. 즉, 초전도 선재의 전압이 급격하게 증가하기 이전에, 고조파 성분의 전압이 더 먼저 급격하게 증가하게 된다. 이 점은 초전도 선재의 resistive state로의 normal transition을 결정하는 기준, 즉 선재의 임계 전류를 결정하는 기준의 근거가 될 수 있다.

4. 결 론

저자들의 이전의 연구에서는 초전도 선재의 교류환경에서의 임계전류 예측을 위해서 단순히 길이당 발생하는 전압의 진폭값을 $1 \text{ mV}_{peak}/\text{cm}$ 로 제안하였지만, 그림 4에서 보듯이 Tape B는 $1 \text{ mV}_{peak}/\text{cm}$ 이상인 225 A_{peak} 부근에서 전압신호, V 의 onset point가 나타난다. 따라서 지난 논문에서 제안되었던 단순한 전계의 진폭값, $1 \text{ mV}_{peak}/\text{cm}$ 을 통한 선재의 임계전류 기준은 모든 초전도 선재에 일반적으로 적용되기에 무리가 있다. 그러므로 다른 구조, 재료의 초전도 선재에 일반적으로 적용될 수 있는 초전도 선재의 임계전류 기준이 필요하다. 본 논문에서는 그림 3과 그림 4에서 전압신호와 제1, 3 고조파 전압의 onset point가 각각 다르게 나타나는 점에 주목하였다. 본래의 전압신호와 함께, 고조파 성분의 급격한 상승이 나타나는 지점을 명확하게 확인하기 위하여 계산한, 제 1, 3 고조파 전압들의 비율인 I_0-V_3/V_1 , V_3/V 그래프의 onset point들도 전압 신호의 상승점 보다는 더 낮은 I_0 에서 나타난다. 이러한 사실은 교류 전류를 통전하는 초전도 선재 혹은 교류 환경에서 동작하는 초전도 전력 기기의 임계전류를 예측하는데 중요한 단서가 될 것으로 예상된다. 또한 임계전류와 더불어, 기존의 초전도 전력 기기의

운전전류를 결정하는데 중요한 요소인 초전도체의 교류 손실, 온도 및 냉각 조건 등과 함께 초전도 전력 기기의 운전전류를 결정하는데 중요한 요소가 될 것으로 기대된다.

운전전류의 결정뿐만 아니라, 고조파 전압의 측정으로 초전도 선재의 normal transition을 미리 알 수 있다는 것은 초전도 전력기에 사용되는 초전도 코일의 quench detection에도 유용한 정보로 사용될 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Power Generation & Electricity Delivery of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Knowledge Economy (No. 20111020400340).

REFERENCES

- [1] J. Choi, S. Lee, S. Choi, M. Park, W. Kim, J. Lee, K. Choi, H. Lee, and S. Hahn, "Conceptual Design of a 5 MVA Single Phase High Temperature Superconducting Transformer," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 18, no. 2, pp. 636-639, Jun. 2008.
- [2] M. J. Gouge, M. J. Cole, J. a. Demko, P. W. Fisher, C. a. Foster, R. Grabovickic, D. T. Lindsay, J. W. Lue, M. L. Roden, and J. C. Tolbert, "High-temperature superconducting tri-axial power cable," Physica C: Superconductivity, vol. 392-396, no. 2003, pp. 1180-1185, Oct. 2003.
- [3] J. Lee, S. Choi, Y. J. Hwang, W. S. Lee, Y. Kim, and T. K. Ko, "Transition Criteria for Critical Current Measurement of High Temperature Superconductor in AC Circumstance," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, no. 3, pp. 6400204, Jun. 2012.
- [4] C. Bean, "Magnetization of high-field superconductors," Reviews of Modern Physics, vol. 267, no. 1960, 1964.
- [5] J. H. Claassen, M. E. Reeves, and R. J. Soulen, "A contactless method for measurement of the critical current density and critical temperature of superconducting films," Review of Scientific Instruments, vol. 62, no. 4, p. 996, 1991.
- [6] H. Yamasaki, Y. Mawatari, and Y. Nakagawa, "Nondestructive determination of current-voltage characteristics of superconducting films by inductive critical current density measurements as a function of frequency," Applied Physics Letters, vol. 82, no. 19, p. 3275, 2003.
- [7] F. Gomory, R. Tebano, and S. Farinon, "Generation of higher harmonics in voltage on superconducting wire carrying cosine-like AC current," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 3622-3625, Jun. 2003.