

논문 19-11-14

초전도 전력기기의 계통적용을 위한 실시간 시뮬레이션 기법 개발 (PART 1 : 고온초전도 전력 케이블)

Development of a Real-time Simulation Method for the Utility Application of Superconducting Power Devices (PART 1 : HTS Power Cable)

김재호^{1,a}, 박민원¹, 박대진¹, 강진주¹, 조전욱², 심기덕², 유인근¹

(Jae-Ho Kim^{1,a}, Minwon Park¹, Dae-Jin Park¹, Jin-Ju Kang¹, Jeonwook Cho², Ki-Deok Sim², and In-Keun Yu¹)

Abstract

High temperature superconducting(HTS) power cable is expected to be used for power transmission lines supplying electric power for densely populated cities in the near future. Since HTS power cable is capable of the high current density delivery with low power loss, the cable size can be compact comparing with the conventional cable whose capacity is same. In this paper, the authors propose the real time simulation method which puts a real HTS wire into the simulated 22.9 kV utility grid system using Real Time Digital Simulator (RTDS). For the simulation analysis, test sample of HTS wire was actually manufactured. And the transient phenomenon of the HTS wire was analyzed in the simulated utility power grid. This simulation method is the world first trial in order to obtain much better data for installation of HTS power device into utility network.

Key Words : Bi-2223 HTS wire, Real time digital simulator, RTDS

1. 서론

Kamerlingh Onnes에 의해 초전도현상이 발견된 이후 초전도의 응용을 위한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 특히 손실이 없는 전력수송에 관한 관심과 함께 1961년 R. McFee에 의해 초전도케이블이 처음 제안 되었다. R. McFee의 제안 이후 1980년대 초까지 미국, 일본 등의 세계 각국에서 초전도 케이블에 대한 많은 연구개발이 진행 되었다[1,2].

초전도 전력케이블은 기존 케이블의 구리 도체 대신 고온 초전도체를 사용하며, 매우 낮은 온도에서 전기저항이 없어지는 초전도현상을 이용하여

저손실, 대용량 전력수송이 가능한 전력케이블로서 대도시의 전력공급 문제를 해결할 수 있는 환경 친화적 신 개념의 전력케이블이다. 또한 기존 전력 케이블에 비해 초전도 전력케이블은 765 kV, 345 kV의 초고압이 아닌 154 kV 또는 22.9 kV급 전압으로 대용량 송전이 가능하기 때문에 종래 변전소의 고압 송전을 위한 주변기기를 간략화 할 수 있으며, 송전 손실이 극히 작고 Compact한 케이블에 의해 부지 문제를 해결할 수 있다. 또한, 이러한 장점을 가지는 고온초전도 전력 케이블은 대용량 부하가 밀집된 도심지 전력계통의 신규 설비에 적용시 경제적인 대체 수단이 될 수 있다[3].

최근 임계전류가 높고 기계적 특성이 크게 개선된 고온 초전도체가 개발됨에 따라 전력 응용을 위한 연구가 더욱 활발히 진행되고 있어, 이와 함께 초전도 전력기기의 실 계통 투입을 위한 준비도 함께 선행되어 연구가 이루어 지고 있다.

고온초전도 전력기기는 정상 운전시 임계전류 이하로 전류가 흐르게 되지만, 계통사고 시에는 초

1. 창원대학교 전기공학과 전력 및 대체에너지 시스템 연구실

(경남 창원시 사림동 9)

2. 한국전기연구원 초전도응용 연구그룹

a. Corresponding Author : potopia@changwon.ac.kr

접수일자 : 2006. 8. 16

1차 심사 : 2006. 9. 16

심사완료 : 2006. 10. 24

전도 전력 케이블의 경우 정격전류의 수십배까지, 초전도 변압기의 경우 10배이상 매우 큰 과전류가 3~5 Cycle 동안 과도적으로 흐르게 된다[4]. 그러므로 실 계통 투입 전 정상상태와 사고 상태에서 전력계통 및 초전도 전력기기에 발생하는 현상을 정확히 예측 할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 실시간 전력계통 해석 Simulator인 RTDS (Real Time Digital Simulator)를 이용하여 초전도 전력케이블이 연결된 전력계통은 PSCAD를 통해서 모의되고 초전도 전력케이블의 저항값은 실제 초전도체를 통해 모의되어 실시간 시스템의 과도해석값을 획득할 수 있는 새로운 시뮬레이션 알고리즘을 개발하였다.

2. 시스템 구성 및 시뮬레이션 방법

2.1 실험에 사용된 샘플 및 특성

표 1의 HTS wire를 이용하여 그림 1의 실험 Sample을 제작하였다. Sample의 전체 길이는 300 mm이고, 전압탭간 거리는 200 mm이다. 실험에 사용된 고온초전도선은 Powder-in-tube의 공정으로 제작되었으며, 과전류에 의한 선재의 단선보호, 기계적 강도 향상등의 목적으로 초전도선의 양면에 Cu-Zn 합금의 wire가 적층 되어있다.

표 1. 실험에 사용된 Bi-2223 HTS wire의 특성.

Table 1. Specification of Bi-2223 HTS wire.

Maker	Critical current[A] (1 μ V/Cm, 77K)	Dimension[mm] (width \times thickness)	Sheath
AMSC	115.2	4.2 \times 0.37	Ag-alloy (Cu-Zn Laminated)

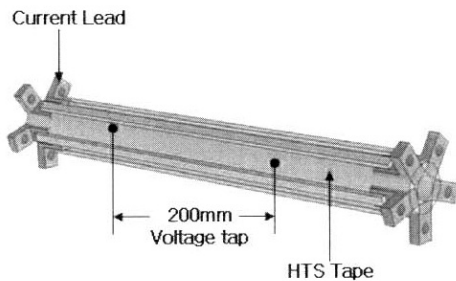


그림 1. RTDS와 연계하여 운전된 초전도선 실험 샘플.

Fig. 1. HTS wire test sample connected to RTDS.

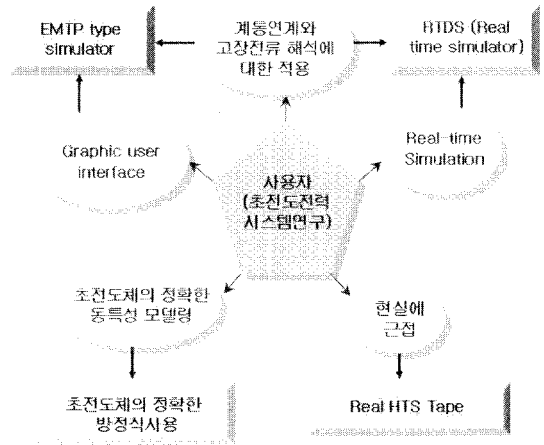


그림 2. 제안된 시뮬레이션 개념도.

Fig. 2. Conceptual diagram of the proposed simulation.

2.2 RTDS와 초전도 선의 연계운전 방법

그림 2는 RTDS를 이용한 실시간 시뮬레이션의 개념도이다. RTDS는 전력시스템의 전자기적 과도 현상을 모의하기 위한 실시간 Digital Simulator이다. RTDS를 사용하여 시스템의 제어 알고리즘이나 보호 장비 등의 페루프 시험을 실시할 수 있으며, 시스템 장비들의 동작 특성 등을 분석할 수 있다. RTDS는 실시간 계산이 가능한 고속의 프로세서들이 들어있는 하드웨어와 시뮬레이션을 모의하고 동작시키는 소프트웨어가 결합된 형태이다. RTDS가 다른 시뮬레이터와 다른 점은 실시간으로 시뮬레이션을 수행할 수 있어 실제 시스템과의 연계운전이 가능하다는 점이다. 이것은 RTDS가 실제 계통에서의 조건을 더 사실적으로 나타낼 수 있게 해줄 수 있음을 의미하며, 여러 논문[5]을 통해서 응용기술이 개발되고 있다.

그림 3은 실험에 사용된 HTS wire의 임계전류 특성 그래프이다. HTS wire는 임계전류 이하에서 저항은 "0"이다. 하지만, 임계전류 이상에서는 비선형적으로 증가하는 저항 특성을 나타낸다. 본 논문에서는 RTDS와 HTS wire의 연계 시뮬레이션을 위하여 실험에 사용된 HTS wire의 V-I 그래프에서 식 (1)의 방정식을 유도하였으며, RTDS 내부에 가변저항 Component를 구현 하였다. 그리고 PSCAD를 이용하여 계통을 구성한 후 HTS wire의 전압을 피드백 받아 구현된 가변저항 Component에 입력하였다.

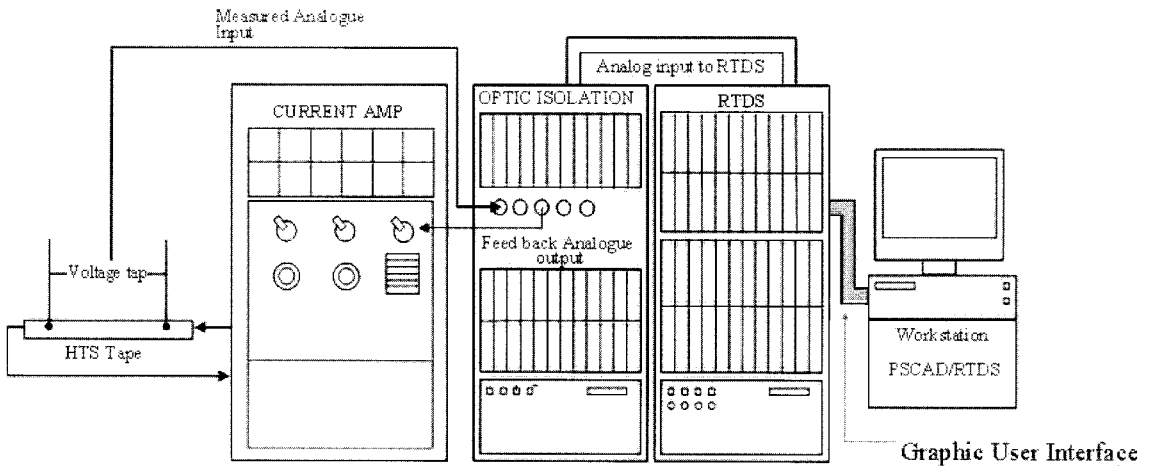


그림 4. 제안된 시뮬레이션 시스템의 하드웨어구성.
 Fig. 4. Hardware composition of the proposed simulation system.

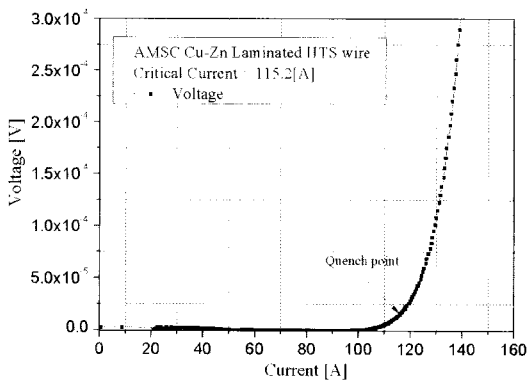


그림 3. 실험에 사용된 Bi-2223 HTS wire의 V-I 그래프.
 Fig. 3. V-I Curve of the Bi-2223 HTS wire used in experiment.

$$Y = 1.12 \times 10^{-3} + \frac{(2.74 \times 10^{-7} - 1.12 \times 10^{-3})}{1 + \exp\left(\frac{x - 145.97}{6.99}\right)} \quad (1)$$

Y : Voltage level
 x : Transport current

2.3 시스템 구성

그림 4는 제안된 시뮬레이션 시스템의 전체 구성을 나타내고 있다. 선로 및 제어 회로의 구성, 컴파일, 시퀀스, 시뮬레이션의 실행은 워크스테이션 부분에서 담당하고 실시간 시뮬레이션을 위한

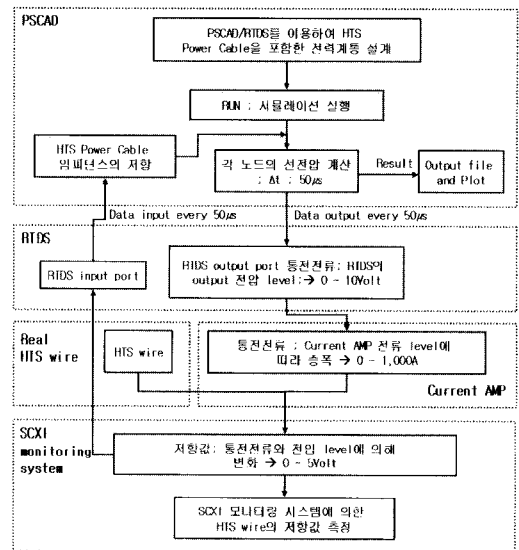


그림 5. 제안된 시뮬레이션 알고리즘.
 Fig. 5. Proposed simulation algorithm.

계산은 RTDS에서 이루어진다. Optic Isolation Rack은 RTDS와 외부 입력 및 출력 신호의 전기적인 절연을 목적으로 사용되며, Current Amp는 RTDS를 통해 실시간으로 출력되는 시뮬레이션 내의 가상 전류를 실제 값의 크기만큼 증폭시켜 주어 HTS wire에 전류 통전을 시켜준다.

전체 시스템의 흐름은 그림 5의 알고리즘에 의해 페루프로 운전된다. RTDS와 Current Amp,

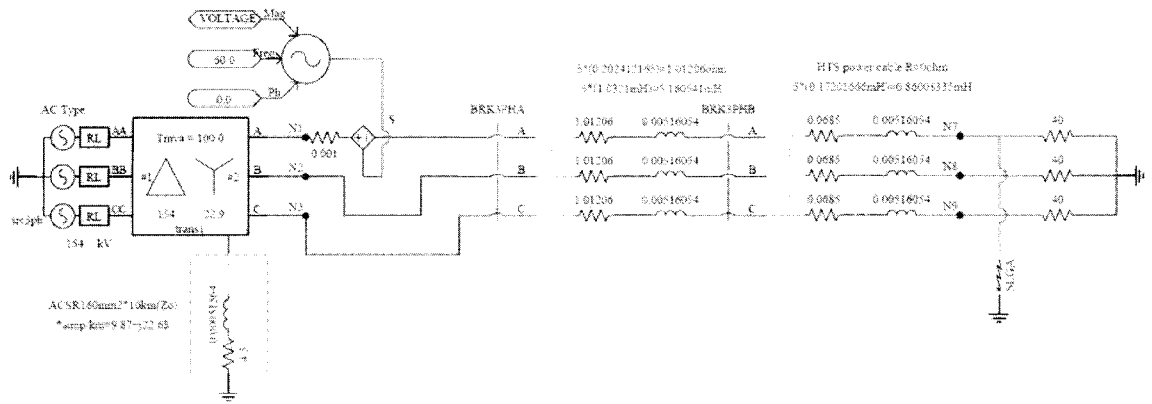


그림 6. RTDS의 PSCAD에서 구현된 22.9 kV 급 전력 시스템 모델.
 Fig. 6. 22.9 kV class power system model in PSCAD/RTDS.

HTS wire의 연계운전 알고리즘 구현을 위해 PSCAD 상에서 HTS wire의 전압을 피드백 받아 Current Amp의 출력력을 제어하는 선로 및 회로를 구성하였다. 그리고 워크스테이션을 통해 RTDS와 연결하였으며, RTDS의 Digital Signal Processor (DSP)를 통해 실시간 시뮬레이션의 계산이 수행된다.

본 논문에서 초기 출력전류는 RTDS 내부 선로 임피던스 값에 의해 HTS wire에 통전되는 Current Amp의 출력전류가 결정된다. 초전도 전력케이블의 후미 선로에 고장이 발생하게 되면 초전도 전력케이블에도 고장 전류가 흐르게 되고 그 값은 RTDS 아날로그 출력단을 통해서 출력된다. 출력된 값은 Current Amp를 통해서 일정한 크기로 증폭되어 실제 초전도선 샘플에 흐르게 된다. 실제 샘플에 흐르는 전류가 임계전류 이상이 되면 HTS wire에 켄치가 발생하고 이로인해 저항값은 비선형적으로 급변하게 된다. 이 저항값은 RTDS의 아날로그 입력을 통해 내부 가변저항 Component로 입력되고 순시적으로 PSCAD내의 초전도 전력케이블 저항값으로 계산되어 진다. 이때 선로의 전체 임피던스는 증가하게 되고 고장전류는 감소하게 되는 알고리즘으로 구현되어 있다. 상기 설명된 내용이 모두 하나의 RTDS 샘플링 시간(50 μs)에 이루어 지게 되어 실제 시스템과 거의 동일한 동특성 데이터를 확보할 수 있게 된다.

실시간 시뮬레이션에 입력 및 출력 되는 전기적인 신호는 SCXI (Signal Conditioner)에서 측정하였으며, LabVIEW 프로그램을 사용하였다.

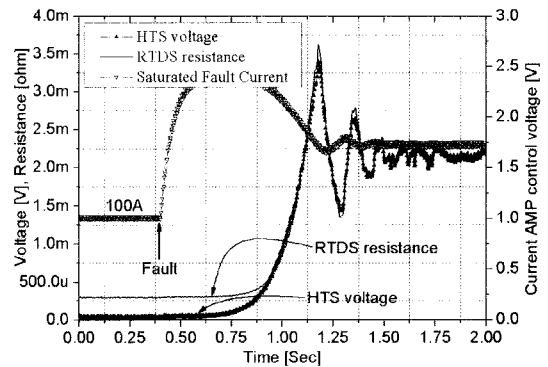


그림 7. HTS wire의 통전전류에 의한 피드백 전압 및 저항변화.
 Fig. 7. Fluctuation of feedbacked voltage and resistance level according to the current which flows into HTS wire.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 6은 시뮬레이션을 위해 PSCAD에서 구성한 22.9 kV급 선로이다. 전원, 변압기, 차단기, 기존 전력케이블 선로 5 km, 초전도 전력케이블 선로 5 km, 부하로 구성되어 있다.

그림 7은 RTDS와 전류앰프를 통해 출력된 전류값과 HTS wire를 통해 피드백된 전압 및 저항값을 나타낸다. 정상상태에서 100 A의 전류가 HTS wire에 통전되고 있으며, 선로에 사고가 발생하면 250 A 까지 증가하게 된다. HTS wire에서 켄치 발생으로 RTDS로 피드백 되는 전압 및 저항이 증

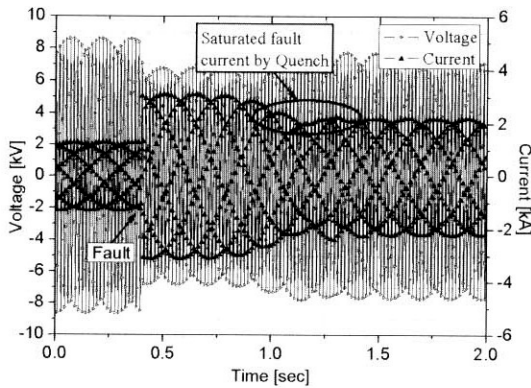


그림 8. 가상 선로의 전압, 전류 변화.
 Fig. 8. Change of voltage and current in imagination line.

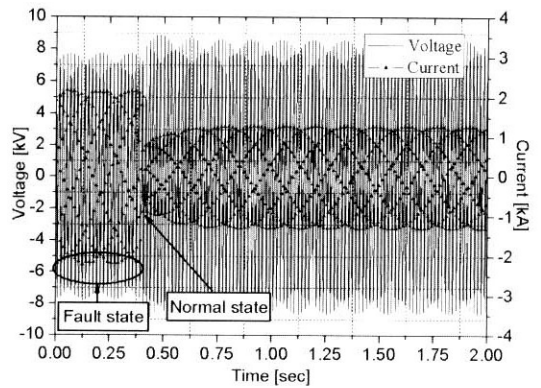


그림 10. 고장 소멸 후, 가상 선로의 전압, 전류변화.
 Fig. 10. After fault extinction, change of voltage, current in imagination line.

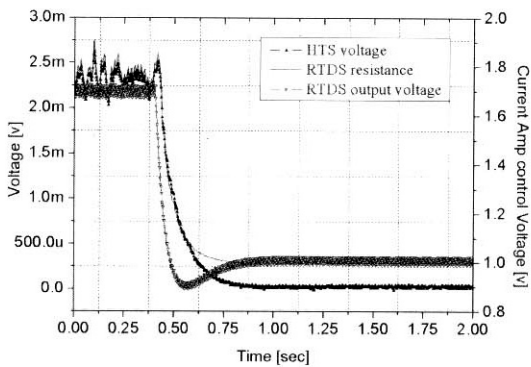


그림 9. 고장 소멸 후, 피드백 전압의 변화.
 Fig. 9. After fault extinction, change of feedback voltage level according to the current which flows into HTS wire.

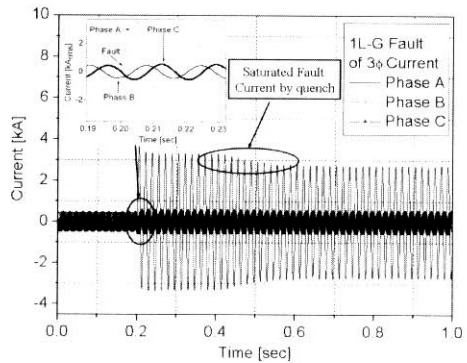


그림 11. 그림 6의 22.9 kV 선로에서 1선지락 고장 발생시 시뮬레이션 결과.
 Fig. 11. Simulation result from the 22.9 kV power system of Fig. 6 at a one line-ground fault condition.

가하게 되고, 이는 곳 선로의 임피던스가 증가하게 되는 것으로 선로의 고장전류를 제한하는 결과를 가져온다. 또한, HTS wire의 특성 방정식에 의해 구현된 RTDS 내부 저항도 HTS wire의 특성과 같은 것을 확인 하였다. 그림 8은 사고 발생시 RTDS 내부 가상 선로의 전압 및 전류의 변화 그래프이다. 고장이 발생하면 선로에 흐르는 전류는 증가하고 전압은 감소하는 것을 알 수 있으며, 증가한 통전 전류는 초전도체의 퀸치를 유도하고 이는 다시 통전 전류의 변화를 가져온다. 결과적으로 초전도 전력케이블의 고장전류는 선로내의 퀸치에 의해 어느 특정 전류값에서 포화됨을 알 수 있다.

본 논문에서는 이를 '초전도 전력케이블 퀸치 포화 전류'라 한다. 그림 9는 고장 소멸 후 Feedback 전압의 변화 그래프이다. HTS wire는 퀸치 상태에서 회복되어 저항값은 '0'이 되고 RTDS로 입력 및 출력되는 전압이 고장 이전의 상태로 복구되는 것을 확인 하였다. 그림 10은 고장 소멸 후 PSCAD에서 구성된 가상 선로에 흐르는 전압 및 전류 그래프이다. 고장 소멸 후 선로 전체 임피던스 변화에 의해 전압은 증가하고 전류는 감소해서 고장 이전의 상태로 복구되는 것을 확인 할 수 있다. 그림 11은 22.9 kV 선로의 A상에 1선지락 고

장 발생시 전류변화 그래프이다. 지락고장이 발생한 A상의 전류는 증가하지만 피드백된 HTS wire의 저항에 의해 고장전류가 제한되는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 실시간 전력계통 해석 Simulator인 RTDS를 이용하여 실제 고온초전도선과 연계운전을 위한 실시간 시뮬레이션 알고리즘을 개발하였다. 22.9 kV 선로 구성 후 실제 HTS wire와 연계한 시뮬레이션을 통해 초전도 전력케이블의 고장전류는 선로내의 켄치에 의해 특정 전류값에서 포화됨을 알 수 있었으며, 이를 '초전도 전력케이블 켄치 포화전류'라 명 하였다.

본 연구를 통해 초전도 전력케이블, 초전도 변압기, 초전도 한류기 등 초전도선을 사용하는 전력기기의 실 계통 적용을 위해 필수적인 정상상태와 과도상태의 특성 변화를 다양한 조건하에서 실시간 시뮬레이션이 가능하게 되었으며, 실제 시스템과 거의 동일한 동특성 데이터를 확보할 수 있게 되었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Forsyth. E. B and Williams. J. A., "The Technical and : A Case study", Trans. on IEEE PAS-94. p. 161, 1975.

[2] Forsyth. E. B., "The 60 Hz performance of superconducting", Trans. on IEEE PAS-103, No. 8, p. 182, 1984.

[3] S. Honjo and Y. Takahashi, "Outline of verification tests", Cryogenic Eng. In Japan 36, p. 242, 2001.

[4] 차귀수 외, "고온 초전도 변압기 개발", 고온초전도 변압기 개발에 관한 최종 보고서, 산업자원부, p. 167, 2001.

[5] M. W. Park, "A novel real-time simulation technique of photovoltaic generation system using RTDS", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, 2004.

[6] M. W. Park, "Real weather condition based simulation of stand-alone wind power generation system using RTDS", KIEE International Trans. on EMECS, Vol. 4-B, No. 3, p. 146, 2004.

[7] J. D. Lee, M. W. Park, and I.-K. Yu, "A study on the modeling of superconducting fault limiters using EMTDC", IFAC Symposium on Power Plants&Power Systems control, Vol. 1, p. 399, 2003.

[8] J. D. Lee, M. W. Park, and I.-K. Yu, "Real time simulation scheme for stand-alone wind power generation systems", IFAC Symposium on Power Plants&Power Systems control, Vol. 1, p. 278, 2003.

[9] O. Tonnesen, S. Hansen, P. Jorgensen, K. Lomholt, S. D. Mikkelsen, J. Okholm, S. Salvin, J. J. Ostergaard, and H. Miller, "Power application for superconducting cables", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 1, p. 1103, 1999.