

YBCO의 직렬연결에 따른 자속구속형 초전도 한류기의 퀸치특성

論 文

55A-8-3

Quench Characteristics of Flux-Lock Type Superconducting Fault Current Limiter According to The Number of YBCO

李 相 一* · 朴 炯 旻** · 崔 孝 祥†

(Lee Sang Il · Hyoung-Min Park · Hyo-Sang Choi)

Abstract - We investigated the quench characteristics of a flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) depending on the number of the serial connection between the superconducting elements at the subtractive polarity winding of a transformer. The flux-lock type SFCL consists of two coils. The primary coil is wound in parallel to the secondary coil through an iron core, and the secondary coil is connected to the superconducting elements in series. The operation of the flux-lock type SFCL can be divided into the subtractive and the additive polarity windings depending on the winding directions between the primary and secondary coils. In this paper, the analyses of voltage, current, and resistance of superconducting elements in serial connection were performed to increase the power capacity of flux-lock type SFCL. The power burden was reduced through the simultaneous quenching between the superconducting elements. This enabled the flux-lock type SFCL to be easy to increase the capacity of power system.

Key Words : 자속구속형 초전도 한류기, 초전도소자 직렬연결, 동시퀸치

1. 서 론

최근 경제성장과 산업발전과 함께 전력수용을 위한 대단 위 발전설비가 지속적으로 증가하고 있다. 전원설비의 증가는 전력계통내에서 등가임피던스의 감소를 야기시키고 이에 따라 단락사고에 의한 고장전류의 크기는 점점 증가하는 추세이다. 현재 전원밀집지역에서는 고장전류가 차단기의 차단내력을 초과하고 있으며 그 수는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 이러한 고장전류의 대책으로 이상적인 한류기는 정상상태에서 임피던스가 제로이고 사고시 임피던스가 충분히 높아야 하고 고장전류에 대한 빠른 동작 및 회복시간을 요구하고 있다[1]-[6]. 초전도 한류기는 위의 조건을 만족시키는 신 개념의 보호기기로서 세계적으로 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 다양한 종류의 한류기들 중 자속구속형 초전도 한류기는 영저항 특성을 이용하는 것으로 저항형 초전도 한류기로 볼 수 있다. 자속구속형 한류기의 특성은 정상 운전 시 철심에 교류자속이 발생되지 않지만 사고가 발생하여 고장전류가 고온초전도 소자의 임계전류 이상으로 전류가 흐르면 퀸치가 발생하여 소자와 리액터의 임피던스로 인해 사고전류를 제한할 수 있다[7]-[9]. 자속구속형 초전도 한류기를 실계통에 적용하기 위해서는 전압용량과 전류용량

의 증대를 위하여 초전도 소자의 직·병렬연결이 필수적이다. 병렬연결은 전류재분배로 용량증대에 큰 문제가 없으나 직렬연결인 경우 개별 초전도 소자의 약간의 퀸치특성의 차이 때문에 퀸치 불균일의 문제가 있다. 본 논문에서는 감극 결선의 자속구속형 전류제한기의 적용전압 확대방안을 위하여 초전도 소자를 직렬 연결하여 전압과 전류 및 저항특성을 분석하였다.

2. 실 험

2.1 자속구속형 전류제한기의 등가 회로도

그림 1은 자속구속형 한류기의 등가 회로도를 보여주고 있다. 그림 2는 자속구속형 한류기를 직렬 연결했을 때 비교하기 위한 저항형 한류기에 소자3개를 직렬 연결한 회로도이다. 그림 1에서 I_{FCL} 은 선로전류이며, I_1 은 변압기의 1차측 권선에 흐르는 전류, I_{SC} 는 2차측 권선에 직렬로 연결된 초전도 소자에 흐르는 전류이다. L_1 과 L_2 는 변압기 1, 2차측 권선의 인덕턴스를 각각 나타낸다. 1, 2차측의 누설인덕턴스를 무시하면 결합계수 k 가 1이 되기 때문에, M_{12} 는 1, 2차측의 상호 인덕턴스로써 $M_{12} = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$ 이라고 할 수 있다. 그림 1을 통해서 전압과 전류의 관계식을 다음 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_1 = V_2 + V_{SC} \quad (1)$$

$$I_{FCL} = I_1 + I_{SC} \quad (2)$$

† 교신저자, 正會員 : 朝鮮大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博
E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

* 正會員 : 朝鮮大 工大 電氣工學科 教授

** 正會員 : 朝鮮大 工大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2006年 3月 6日

最終完了 : 2006年 6月 16日

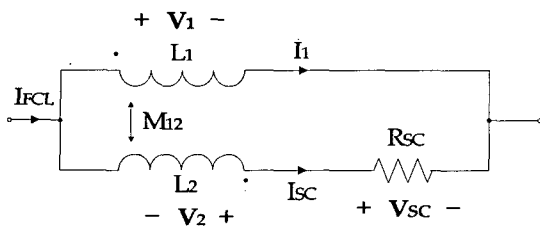


그림 1. 감극 결선한 자속구속형 SFCL의 등가회로도
 Fig. 1. Equivalent circuit of flux-lock type SFCL wound in a subtractive polarity winding

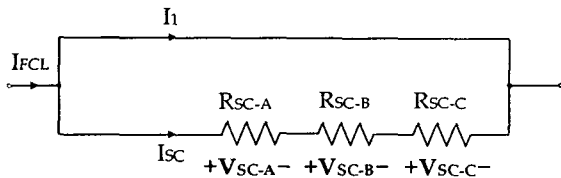


그림 2. 소자3개를 직렬 연결한 저항형 SFCL의 등가회로도
 Fig. 2. Equivalent circuit of the resistive type SFCL with three superconducting elements connected in series

변압기 1,2차측의 권선에서 누설 인덕턴스가 없다고 가정하고 초전도 소자에서 발생하는 저항이 R_s 로 같다고 할 때, 전체 임피던스는 Z_{FCL} , 1차측 전류 I_1 과 초전도 소자에 흐르는 전류 I_{sc} 를 그림 1의 등가회로도로부터 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

1) 단독소자

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega L_1 R_s}{j\omega L^2 + R_s} \quad (3)$$

$$\frac{I_{sc}}{I_{FCL}} = \frac{j\omega(L_1 + \sqrt{L_1 L_2})}{j\omega L^2 + R_s} \quad (4)$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{j\omega \sqrt{L_1 L_2} + j\omega L_2 + R_s}{j\omega L^2 + R_s} \quad (5)$$

2) 직렬연결한 소자 2개

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega L_1 (2R_s)}{j\omega L^2 + 2R_s} \quad (6)$$

$$\frac{I_{sc}}{I_{FCL}} = \frac{j\omega(L_1 + \sqrt{L_1 L_2})}{j\omega L^2 + 2R_s} \quad (7)$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{j\omega \sqrt{L_1 L_2} + j\omega L_2 + 2R_s}{j\omega L^2 + 2R_s} \quad (8)$$

3) 직렬연결한 소자 3개

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega L_1 (3R_s)}{j\omega L^2 + 3R_s} \quad (9)$$

$$\frac{I_{sc}}{I_{FCL}} = \frac{j\omega(L_1 + \sqrt{L_1 L_2})}{j\omega L^2 + 3R_s} \quad (10)$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{j\omega \sqrt{L_1 L_2} + j\omega L_2 + 3R_s}{j\omega L^2 + 3R_s} \quad (11)$$

위의 식에서 L 은 $\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2}$ 를 나타낸다. 식 (3), (6), (9)에서 알 수 있는 것과 같이 초전도 소자의 직렬 연결시 전체 임피던스(Z_{FCL})가 증가하지만 초전도 소자에 흐르는 전류(I_{sc})는 감소한다는 것을 확인할 수 있다.

사고 발생 직후 초전도 소자에서 발생하는 전류가 임계전류값에 도달하였을 때 초기 제한전류를 I_{ini} 라고 정의하였을 때, 식 (4), (7), (10)에 $R_{sc}=0$, $I_{sc}=I_q$, $I_{FCL}=I_{ini}$ 를 대입함으로써 다음과 같이 하나의 식으로 표현할 수 있다.

$$I_{ini} = \left(\frac{L}{\sqrt{L_1}}\right) I_q \quad (12)$$

위의 식 (12)를 통해서 초전도 소자가 직렬로 연결되더라도 초기에 제한되는 사고전류는 같은 값이라는 것을 알 수 있다.

2.2 실험 방법

그림 3는 전력계통 사고를 간단히 모의하기 위한 실험회로도를 보여준다. V_s 는 전원전압, R_m 은 선로임피던스를 모의하기 위한 표준저항이며 R_L 은 선로의 부하저항을 나타내고 있다. 1차권선과 2차권선을 감극으로 결선한 후 그림 3에서 스위치 SW_1 을 닫아 회로에 전압을 인가했다. 회로에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하지 않았기 때문에 자속구속형 고온초전도 한류기는 단락선로처럼 동작하게 된다. 스위치 SW_2 를 닫아 단락사고를 발생시키면 고온초전도 소자에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하게 되고 켄치가 발생한다. 이때 회로에 흐르는 선로전류(I_{FCL}), 1차권선에 흐르는 전류(I_1), 초전도소자에 흐르는 전류(I_{sc}), 1,2차권선의 양단전압(V_1 , V_2)과 초전도소자 양단전압(V_{sc})을 측정하였다. 1,2차 권선의 턴수비는 63:21로 하였고 전원전압은 115V로 인가하였으며 소자 각각의 켄치특성을 분석한 다음 단독소자, 소자 2개, 소자3개를 직렬 연결하여 실험하였다.

그림 4은 이번 실험에 사용한 초전도 소자인 YBCO 박막의 패턴형태를 보여주고 있다. 초전도 한류소자는 직경 2 inch의 Al_2O_3 기판위에 성장된 두께 $0.3\mu m$ 의 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막을 이용하여 독일 THEVA사에서 제작하였다. 표 1은 초전도 소자의 제원과 이번 실험에 사용한 소자 A, B, C의 임계전류값을 보여주고 있다.

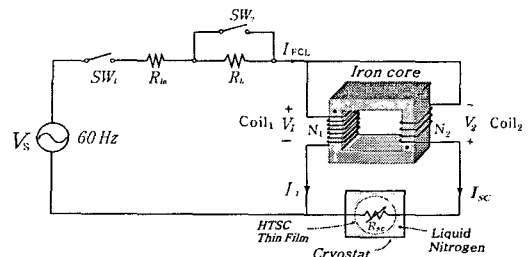


그림 3. 자속구속형 전류제한기의 실험회로도
 Fig. 3. Scheme of experimental circuit for flux-lock type SFCL

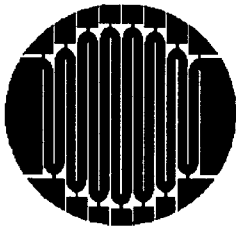


그림 4. 초전도 한류소자의 패턴모양
Fig. 4. The pattern shape of a YBCO thin film

표 1. 개별한류소자의 임계전류값
Table 1. The Critical Current Values (I_c) of Three SFCL

Parameter	YBCO A	YBCO B	YBCO C
Critical Current Values (I_c)	24.6 A	24.4 A	22.5 A

3. 실험 결과 및 고찰

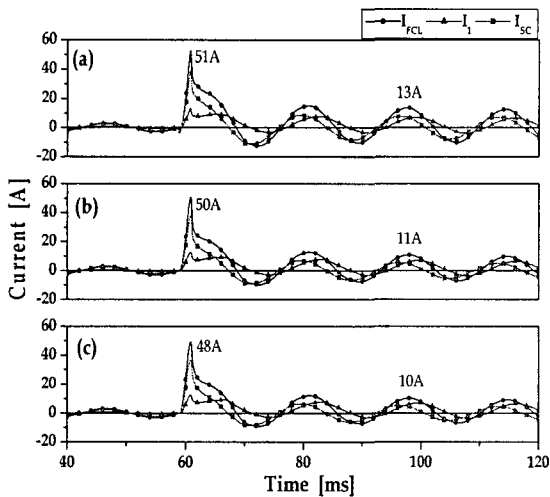


그림 5. 감극결선시 초전도 소자의 증가에 따른 전류 파형
Fig. 5. Current waveforms depending on the number of the superconducting element in a flux-lock type SFCL
(a) 단독소자 (b) 소자 2개 (c) 소자 3개

그림 5은 감극 결선시 소자를 직렬 연결하였을 때 전류파형을 보여주고 있다. 그림 5(a)를 보면 단독소자시 선로전류 (I_{FCL}) 피크값이 51 A에서 3주기에는 13A로 감소되는 것을 알 수 있다. 그림 5(b)를 보면 소자 2개를 직렬 연결하였을 때 선로전류(I_{FCL}) 피크값은 50A에서 3주기에는 11A로 감소하였고 그림 5(c)를 보면 소자 3개를 직렬 연결하였을 때 선로전류 피크값이 48A에서 3주기에는 10A로 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 자속구속형 한류기를 직렬 연결하였을 때 식 (12)에서 확인 했듯이 직렬로 연결되더라도 초기에 제한되는 사고전류는 같은 값이고, 사고후 초전도 소자의 전체저항도 비슷한 값을 나타냄을 의미한다. 그림 6는 소자를

직렬 연결하였을 때 전압 파형을 나타내고 있다. 그림 6(b)의 전압파형을 보면 사고 발생 후 임계 전류값을 넘어 퀘치가 발생할 때 직렬 연결된 초전도소자의 약간의 퀘치전류 (I_q)의 편차 때문에 발생하는 퀘치시작의 차이가 보이지만 3 주기 이후에는 거의 같음을 알 수 있다.

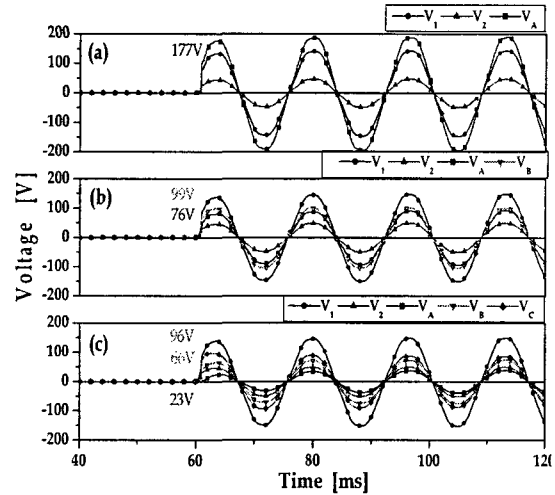


그림 6. 감극결선시 초전도 소자의 증가에 따른 전압 파형
Fig. 6. Voltage waveforms depending on the number of the superconducting element in a flux-lock type SFCL
(a) 단독소자 (b) 소자 2개 (c) 소자 3개

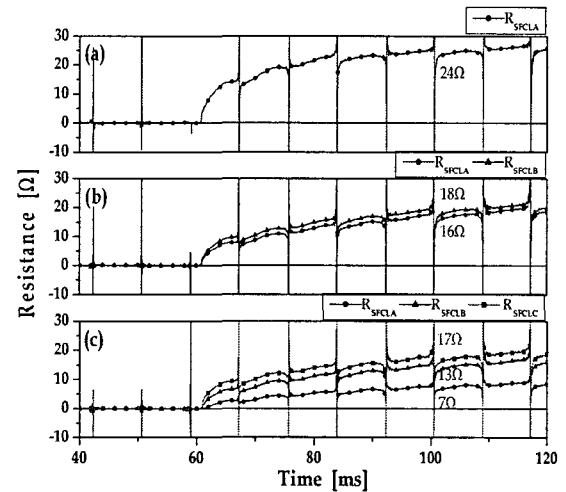


그림 7. 감극결선시 초전도 소자의 증가에 따른 저항 파형
Fig. 7. Resistance waveforms depending on the number of the superconducting element in a flux-lock type SFCL
(a) 단독소자 (b) 소자 2개 (c) 소자 3개

또한 단독소자일 때 첫 주기의 그림 6(a)에서 초전도 소자의 전압 피크값은 177V, 2개의 직렬 연결시 소자 A(V_{SC-A})는 76V, 소자 B(V_{SC-B})는 99V로 전압분배가 확실하게 되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 초전도소자 1개가 갖는 부담을 줄일 수 있고 자속구속형 한류기가 동시퀘치

유도와 용량증대에 유리하다는 것을 알 수 있다. 그림 6(c)의 전압파형을 보면 첫주기때 소자 A(V_{SC-A})는 23V, 소자 B(V_{SC-B})는 66V, 소자 C(V_{SC-C})는 96V였고 3주기 이후에 소자 B와 소자 C의 전압값이 비슷하다는 것을 확인할 수 있다. 이는 소자 2개의 직렬 연결시보다 전압분배의 불균형이 약간 존재하지만 단독 소자시와 소자 2개의 직렬연결시 전압분배의 균형으로 보아 인가전압의 증가시 불균형의 차이는 줄어들 것으로 예상된다. 그림 7은 소자를 직렬 연결하였을 때 저항파형을 나타내고 있다. 그림 7(a)의 초전도 저항(R_{SC-A})을 보면 3주기 이후에 초전도체에 상전도 전이가 완전하게 이루어져 일정한 값에 도달되는 것을 확인할 수 있다. 그림 7(b)를 보면 초전도소자 A, B의 저항이 거의 같음을 알 수 있다. 이는 동시퀠치로 인해 저항이 거의 비슷한 것을 확인할 수 있다. 그림 7(c)의 저항을 보면 소자 B(R_{SC-B})와 소자 C(R_{SC-C})의 저항이 소자 A(R_{SC-A})의 저항과 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다.

이는 초전도소자가 갖고 있는 임계전류 불균일에 의해 발생하며 인가전압을 높이거나 셉트인덕턴스 혹은 외부자장 인가를 통하여 개선할 수 있을 것이다.

그림 8은 그림 2에서와 같이 저항형 한류기에서 소자 3개를 직렬연결시 전압, 전류 저항파형의 특성을 나타내고 있다.

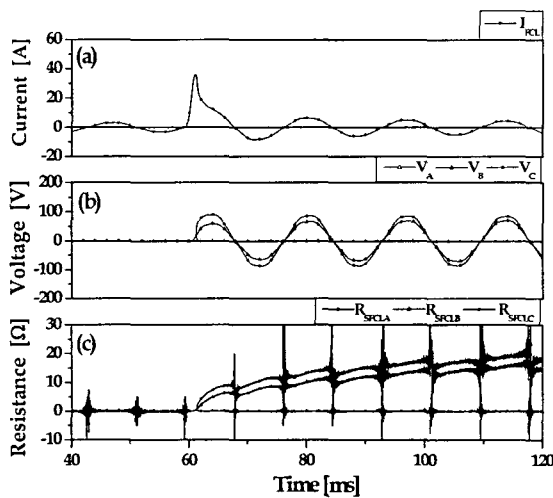


그림 8. 소자3개가 직렬연결된 저항형 초전도 한류기의 전기적 특성

Fig. 8. Electrical characteristics of the resistive type SFCL with three superconducting elements connected in series

(a) current. (b) voltage. (c) resistance

그림 8(b)와 8(c)를 보면 소자A가 퀠치가 되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 저항형 한류기의 직렬 연결시 전압용량 증대에 큰 문제가 있음을 알 수 있다. 그러나 자속구속형 한류기는 위의 실험결과로 보아 저항형 한류기보다 동시 퀠치에 다소 유리함을 알 수 있다. 이는 자속구속형 한류기에서 1,2차권선에서 발생하는 자속이 직렬연결된 소자에 영향을 줌으로써 소자간 퀠치시작시점의 차이가 줄어들었기 때문으로 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는 자속구속형 초전도 한류기의 적용전압 확대방안을 위하여 초전도 소자를 직렬 연결하여 전압과 전류 및 저항특성을 분석하였다. 단독 소자일 때와 소자 2개를 직렬로 연결한 경우를 비교하였을 때 소자 2개를 직렬로 연결한 경우는 초전도소자에서 약간의 퀠치전류(I_q)의 편차 때문에 발생하는 퀠치 시작 시점의 차이가 약간 보이지만 3주기 이후에는 거의 같음을 알 수 있었다. 또한 전압분배가 비교적 균등하게 이루어져 초전도소자 1개가 갖는 부담을 줄일 수 있고, 자속구속형 한류기가 용량을 증대시키는데에 유리하다는 것을 알 수 있었다. 소자 3개 연결시 초전도소자 전압의 불균형이 있었지만 단독 소자 시와 소자 2개의 직렬연결시 전압분배의 균형으로 보아 인가전압의 증가시 불균형의 차이는 줄어들 것으로 예상된다. 또한 저항형 한류기보다 자속구속형 한류기가 동시퀠치에 유리함을 확인할 수 있었다. 이는 자속구속형 한류기가 저항형 한류기에 비해 한류소자에 영향을 주는 자속이 존재함으로써 가능하였다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 조선대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, and W. Lanz, "Fault current limiter based on high temperature superconductors - different concepts, test results, simulations, applications", *Physica C*, Vol. 354, p. 27-33, 2001.
- [2] T. Matsumura, T. Uchii, and Y. Yokomizu, "Development of flux-lock type current limiter with high- T_c superconducting element," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 7, pp. 1001-1004, June 1997.
- [3] H.-S. Choi, H.-R. Kim, O.-B. Hyun, and S.-J. Kim, "Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after overpowering quenches," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 11, p. 2418-2421, 2001.
- [4] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Krämer, P. Kummeth, H. W. Neu müller and S. Fischer, "Resistive current limiters with YBCO films," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, Vol. 7, pp. 828-831, 1997.
- [5] S. Elschner, F. Breuer, M. Breuer, M. Noe, T. Rettelbach, H. Walter, and J. Bock, "Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for a 10 MVA fault current limiter," *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 13, pp. 1980-1983, June 2003.
- [6] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, "차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레이션", *전기학*

회논문지, Vol. 48C, No. 3, pp.173-178, 1999.

- [7] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, "Fault current limiting characteris due to winding direction between coil 1 and coil 2 in a a flux-lock type SFCL", Physica C, vol. 416, No, 1-2, pp. 34-38, 2004.
- [8] S. H. Lim, H. G. Kang, H. S. Choi, S. R. Lee, and B. S. Han, "Current limiting characteristics of flux-lock type high-Tc superconducting fault current limiter with control circuit for magnetic field", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 13, No, 2, pp. 2056-2059, 2003.
- [9] 박형민, 임성훈, 박충렬, 최효상, 한병성 "자속구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교", 전기전자 재료 학회논문지, 18권 4호 pp.363-369, 2005.

저 자 소 개



이 상 일 (李 相 一)

1942년 12월 20일생, 1967년 조선대학교 전기공학과 졸업(학사), 1985년 2월 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사) 현재 조선대학교 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7028

Fax : 062-230-7020

E-mail : siblee@chosun.ac.kr



박 형 민 (朴 炯 旻)

1978년 4월 12일생, 2003년 조선대학교 전기공학과 졸업, 2004~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-mail : kakanova@naver.com



최 효 상 (崔 孝 祥)

1966년 2월 21일생, 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2003년~한전 전력연구원 선임연구원, 현재 조선대학교 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr