

# 전자장 해석을 통한 매트릭스형 한류기용 리액터 설계 및 특성해석

논문

58P-2-22

## Design and Characterization of a Reactor for Matrix Type SFCLs Using Electromagnetic Field Analysis

정 동 철<sup>†</sup> · 윤 창 훈\* · 최 효 상\*\*

(Dong-Chul Chung · Chang-Hun Yun · Hyo-Sang Choi)

**Abstract** - In this paper, we performed the optimum design of reactors for matrix-type superconducting-fault current limiters (SFCLs), using electromagnetic analysis tools. We decided a optimum position within a reactor for superconducting elements of current-limiting parts and trigger parts from the calculation of magnetic flux intensity for reactor structures. Also we decided effective distance length between two reactors through the analysis of the distribution of magnetic field, according to distance lengths between them. We designed and characterized matrix-type SFCLs, based on our optimum design of a reactor. We confirmed uniform distribution of a fault current, resulted from the improvement of simultaneous quench characteristics within our matrix-type SFCL.

**Key Words** : Fault Current, SFCL, Magnetic Field, Optimum Design of Reactors

### 1. 서 론

우리나라의 전력계통 시스템은 비약적 팽창을 거듭하고 있으며 2009년 기준으로 전력계통 규모는 세계 13위, 전력 거래량은 세계 8위의 규모를 자랑하고 있다. 그러나 급격한 전력산업의 성장은 전력계통의 과밀화와 포화상태를 가져왔으며, 이러한 과밀화는 특정 전력 공급 선로에서 고장전류가 발생할 경우, 연쇄적으로 고장 효과가 파급되어 과밀화된 전력계통에 심각한 위기를 초래할 수 있다. 따라서 최단 시간 내에 고장전류를 차단할 수 있는 효과적인 고장전류 차단기의 필요성이 최근 급격히 대두되고 있는 형편이다[1]-[3].

초전도체의 초전도 상태와 상전도 상태의 급격한 변이를 이용한 초전도 사고 전류제한기는 현존하는 고장전류 차단기 중 가장 신속한 차단 능력을 나타내고 있다. 또한 1/4 주기 (시간으로 환산할 경우, 0.0042 초) 안에 고장전류를 차단하는 고속 차단성능은 일찍부터 초전도 한류기의 전력 계통 투입 가능성을 점쳐왔다 [4]-[6].

현재까지 신속하게 고장전류를 차단하기 위해 개발된 초전도 한류기는 가장 기초적인 저항형을 비롯하여 유도형, 자속구속형, 변압기형 등이 있다. 그러나 초전도 한류기를 실제 전력계통에 투입하기 위해서는 용량 증대 문제와 이에 따른 초전도 소자간 불균일 켄치 문제를 반드시 해결해야만 하는 과제를 안고 있다.

이 논문에서 제시하고 있는 매트릭스형 초전도 한류기는 크게 초전도 소자로 자장을 인가하기 위한 트리거 부와 사

고전류를 차단하는 전류제한 부로 이루어져 있어 효과적인 사고전력 분배가 가능하며 동시에 초전도 소자간 불균일 켄치 특성을 개선할 수 있다 [7]. 이때, 초전도 소자간 불균일 켄치 특성을 개선하는 핵심적 요소 중 하나는 자기장이며 이를 위해 최적의 자기장을 초전도체에 인가할 수 있는 리액터의 제작은 매트릭스형 한류기 제작에서 필수적이라고 할 수 있다. 이 논문에서는 전자기적 해석 도구 (Maxwell 3D ver. 11)를 이용해서 리액터의 자기장 분포를 계산하고 이를 통하여 리액터 내부 자속 분포에 따른 초전도체의 효과적인 배치를 논의하였으며 삼상 고장전류 인가에 대비한 각 리액터 간 최적 이격 거리 등을 분석하였다.

### 2. 실 험

#### 2.1 매트릭스형 한류기의 동작원리

그림 1은 1x2 구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기의 개념도를 나타내고 있다. 매트릭스형 초전도 한류기는 고장 전류 유입시, 최초 고장전류를 감지, 자기장을 발생하여 전류제한 부에 인가해주는 트리거 부와 인가된 자기장의 영향으로 신속한 켄치를 전파, 고장전류를 차단하는 전류제한 부로 이루어져 있다. 그림 1에 제시되어 있는 것처럼 트리거 부의 초전도 소자는 두 개의 리액터를 가지고 있는데 고장 전류가 유입되기 전인 정상상태의 경우, 전류는 임피던스를 가지고 있는 리액터를 우회하지 않고 곧바로 초전도 소자를 통하여서만 흐르므로 계통에 아무런 영향을 주지 않는다. 고장전류가 한류기에 유입할 경우 트리거 부의 초전도 소자는 부분적인 켄치를 발생시키며, 이때 켄치 발생으로 인한 초전도체 자체 임피던스의 증가로 일부 고장전류가 두 개의 리액터로 우회를 하게 된다. 또한 우회된 고장전류는 트리거 부와 전류제한 부를 감싸고 있는 리액터에 자기장을 발생시

\* 정 회 원 : 우석대학교 전기전자공학과 교수 · 공박

\*\* 정 회 원 : 조선대학교 전기공학과 교수 · 공박

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 우석대학교 전기전자공학과 교수 · 공박

E-mail: dchung@woosuk.ac.kr

접수일자 : 2009년 5월 8일

최종완료 : 2009년 5월 18일

킨다. 각 초전도체에 인가된 자기장은 초전도 소자의 임계 특성 차이를 줄여줌으로써 고장전류 유입으로 인한 초전도체의 켄치 발생시 균일한 켄치 전파를 유도한다. 또한 동시 켄치 성능을 향상시킨 1x2 구조를 갖는 초전도 한류기를 종횡으로 매트릭스 형태로 연결할 경우, 용이하게 용량 증대가 가능하다는 점에서 기존의 한류기가 안고 있는 용량 증대 문제 문제를 쉽게 해결할 수 있는 장점을 가지고 있다.

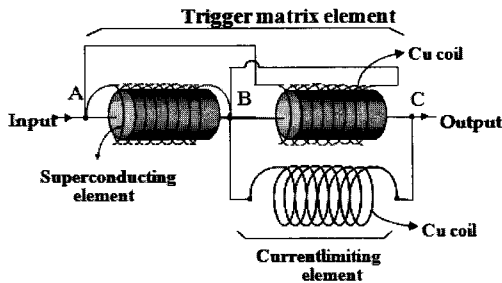


그림 1 1x2 구조를 갖는 초전도 한류기의 개념도  
Fig. 1 Conceptual diagram for matrix-type SFCL with 1x3 matrix

2.2 전자기적 해석을 통한 매트릭스형 한류기용 리액터 최적설계  
가. 리액터 간 이격거리에 따른 리액터 내부 및 외부자속 분포 변화

2.1 절에서 기술한 바와 같이 초전도체간 켄치 특성을 개선하기 위해서는 균일한 자기장 분포를 발생시킬 수 있는 리액터의 구조가 대단히 중요하며 또한 단상 2선식과 3상 4선식 선로에 고장전류가 유입될 경우에 대비하여 리액터간 적절한 이격거리를 계산하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 물론, 리액터간 이격거리가 충분할 경우, 리액터 상호 간에 작용하는 자기장의 영향을 최소화할 수 있지만, 이격 거리의 증가는 한류기 전체 시스템 크기를 증가시키므로 적절한 방법이라고 할 수는 없다. 그림 2는 Maxwell 3D 해석도구를 이용한 자기장 리액터의 설계도이다. 그림 2의 (a)에 제시되어 있는 것처럼 기본 리액터 구조는 두 개의 리액터, A와 B로 이루어져 있으며 켄치 발생 시 액체 질소의 기화로 인한 거품이

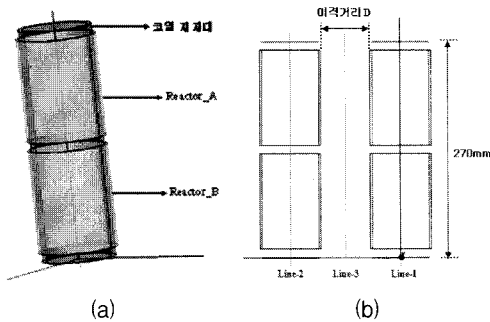


그림 2 Maxwell 3D 해석도구를 이용한 자기장 인가 리액터의 설계도.

- (a) 리액터 구조 기본 설계도
- (b) 2개의 자기장 인가를 위한 리액터 설계도.

Fig. 2 Design of a reactor structure for applying magnetic fields using Maxwell 3D.

- (a) basic design for a reactor structure
- (b) design of two reactors structures for applying magnetic field

용이하게 빠져나갈 수 있도록 두 리액터 사이에 공극을 두었다. 이때 리액터의 지름은 100 mm, 길이는 270 mm였으며 두 리액터의 상호 자속 영향을 분석하기 위해 거리에 따른 전자장 해석을 수행하였다. 설계 조건은 이격거리 20, 30, 50, 70 [mm]로 설정하였으며 리액터에 흐르는 전류는 20 A로 가정하였다. 또한 자속분포 기준을 리액터 중앙을 각각 Line 1과 Line 2로 설정하였고 리액터 간 영향을 분석하기 위해 Line 3을 리액터 사이에 설정하였다.

그림 3은 리액터 간 이격거리에 따른 자속 밀도를 제시한 것이다. 그림에서 제시된 바와 같이 이격거리와는 상관없이, 리액터 내부의 최고 자속은 대체적으로 일정하게 약 2 [Wb]를 나타내고 있다. 리액터 중앙에서 양방향 40 [mm]인 지점에서의 자속밀도가 2 [Gauss]로 가장 높은 자속 분포를 보여주고 있다고 리액터 중앙 부분이 전체적으로 1.85 [Gauss]의 자속 분포를 보여주고 있다. 이는 리액터 중앙이 액체 질소 기화에 따른 거품의 용이한 순환을 위해 코일이 감기지 않은 공극으로 제작되어 있기 때문이다. 이러한 자속분포를 바탕으로 매트릭스형 한류기를 제작할 경우, 고장전류를 감지하여 자속을 발생시키는 역할을 하는 트리거 부의 초전도체를 이 공극에 배치하는 것이 타당할 것으로 보여진다. 이는 실제로 사고전류를 감지하는 역할이 주된 역할인 트리거 부의 초전도체가 높은 자속밀도를 필요로 하지 않기 때문이다. 그러나 전류제한 부의 초전도체는 각 초전도체 간의 임계 특성 차이를 줄이기 위해 최대 자속밀도를 인가해주어야만 한다. 따라서 전류제한 부의 초전도체를 리액터 좌우 40 [mm]인 지점에 배치함으로써 최대 인가 자속을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

또한 그림 3은 이격거리에 따른 자속 밀도분포를 나타내고 있는데 여기서 중요한 점은 Line 3을 기준면으로 하고 있는 이격 거리에 따른 자속밀도 분포 (그림에서 하단 부분의 곡선)는 리액터 사이의 이격 거리가 짧을수록 자속밀도가 증가

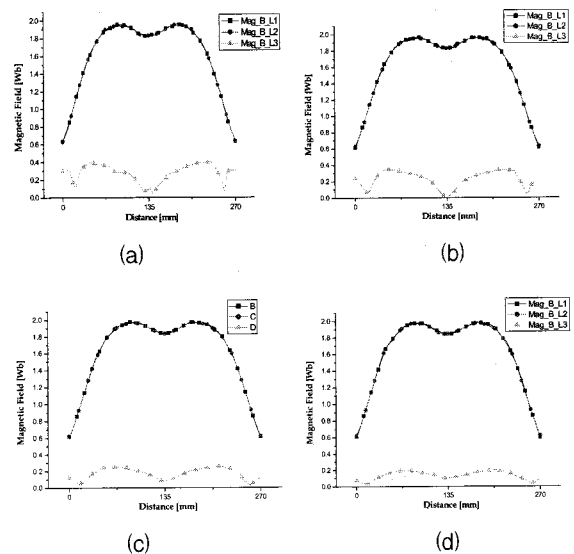


그림 3 두 리액터 간 이격거리에 따른 자속밀도 분포.  
(a) 20 mm (b) 30 mm (c) 50 mm (d) 70 mm

Fig. 3 Distribution of magnetic flux density according to distance length between two reactors.

- (a) 20 mm (b) 30 mm (c) 50 mm (d) 70 mm

하고 있음을 알 수 있으나 리액터 간 간격에 따른 자속밀도 분포가 0.2 [Gauss] 내외여서 리액터 간격에 따른 상호간 자속의 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

전체적으로 이격거리에 비례하는 내부 자속밀도와 이격거리에 반비례하는 외부 자속밀도를 고려할 때, 리액터 상호 영향을 최소화시키고 한류기 전체 시스템 크기를 증가시키지 않는 이격거리는 30 [mm]가 최적 조건임을 확인할 수 있었다.

나. 인가 전류방향에 따른 자속밀도

매트릭스형 한류기를 설계함에 있어 리액터에 인가되는 전류방향이 자속밀도 발생에 어떠한 영향을 주는 지 분석하기 위해 인가 전류 방향에 따른 자기장 분포 분석하였다. 그림 4의 (a)는 전류방향에 따른 두 리액터 간의 자속밀도 분포 계산을 위한 설계도를 나타내며 그림 4의 (b)는 정방향 전류가 인가되었을 때의 자속밀도 분포를 그림 4의 (c)는 역방향 전류가 인가되었을 때의 자속밀도 분포를 나타낸다. 자속밀도 계산을 위해 정방향 전류가 흐를 경우, 리액터 A와 리액터 B에 각각 20 A의 전류가 흐르는 것으로 설정하였으며 역방향 전류가 흐를 경우, 리액터 A에는 20 A의 전류가 리액터 B에는 -20 A의 전류가 흐르는 것으로 설정하였다. 그림 4의 (b)와 (c)에서 보여지는 것처럼 리액터에 정방향 전류가 흐를 때 발생하는 자속의 최대값은 1.96 [Gauss], 역방향 전류가 흐를 경우의 2.05 [Gauss] 자속밀도가 분포하는 것을 확인할 수 있다. 실제 매트릭스형 한류기는 삼상 전력계통에 적용할 것이므로 삼상 적용 시 사고 발생

시점에서의 각 상에 흐르는 전류의 방향이 다르므로 삼상 시스템에 적용하기 위한 결과로는 적절치 못하다고 볼 수 있다. 이는 각 시점에 따라 삼상 전류의 위상이 틀러지기 때문이다. 또한 정, 역방향 전류에 따른 리액터 내부의 자속 밀도에는 큰 차이가 없으므로 실제 실험에서는 정방향 전류가 흐르는 것으로 설정하여 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

2.2절의 전자기적 해석을 통해 도출된 리액터의 최적 설계 요소를 이용하여 매트릭스형 한류기를 제작하고 그 특성분석을 위한 고장전류 인가 실험을 실시하였다. 그림 5는 실제 제작된 매트릭스형 한류기의 리액터와 여기에 장착된 트리거 부와 전류제한 부의 초전도체의 사진을 제시한 것이다. 사진에서 보여지는 것처럼 각각의 초전도체는 한 개의 리액터 내의 공극 부분과 리액터 중앙에서 좌우 40 [mm] 지점에 장착하였다. 제작된 매트릭스형 한류기의 고장 차단 특성을 살펴보기 위해 고장전류를 인가하여 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 리액터의 권선은 총 570 [turn]이었다. 그림 6의 (a)에 제시되어 있는 것처럼 고장전류 (I-FCL)의 총 유입량은 40 A였으며 1/4 주기인 지점에서 급격하게 20 A로 차단되고 이후 10 A 부근에서 안정적으로 고장전류를 차단하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 각 상에 흐르는 고장전류 (I-Tc, I-Td)들도 전체적으로 적절하게 분배되어 차단되고 있으며 이는 균일한 인가 자기장 분포에 따른 초전도 소자간 켄치 특성이 향상된 결과로 적절한 사고전력 분배가 일어나고 있다고 판단할 수 있다. 이때 리액터로 우회되는 전류 (I-LT2)가 전체 사고전류와 비슷한 사고전류 분배를 하고 있으며 사고 전류를 감지하는 트리거 부의 초전도체의 부분 켄치로 인한 다소 작은 사고 전류 분포를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 결과는 애초 트리거 부의 초전도체는 고장전류를 감지하는 것이 목적이므로 크게 고려할 사항은 아닌 것으로 판단된다. 그림 6의 (b)는 최초 고장전류가 발생한 시점부터 3주기 동안의 전압 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 제시된 것처럼 트리거 부의 전압 (V-T2)이 매우 낮은 분포를 보여주는데 이것은 그림 6의 (a)에서 기술한 것처럼 초전도체가 완전한 켄치를 이루지 못하고 일부 초전도 상을 가지고 있기 때문인 것으로 보여진다. 또한 c상과 d상의 고장전류 유입에 따른 전압 또한 동일한 곡선 특성을 보여주고 있음을 확인할 수 있는데 이러한 현상 또한 사고 전력이 각 상 별로 적절하게 분배되고 있음을 보여주는 증거라고 할 수 있다.

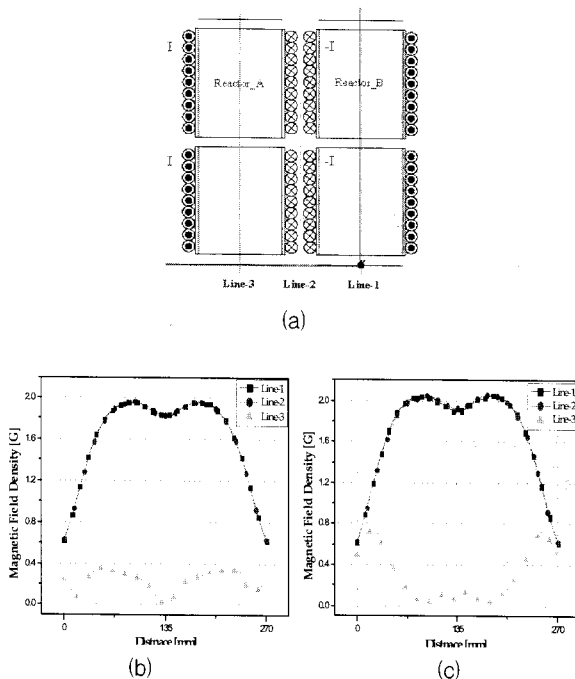


그림 4 인가전류 방향에 따른 자속밀도 분포  
(a) 전류방향에 따른 설계도 (b) 정방향 전류  
(c) 역방향 전류

Fig. 4 Distribution of magnetic field according to applying currents  
(a) a design according to a current direction  
(b) a forward direction current  
(c) a reverse direction current

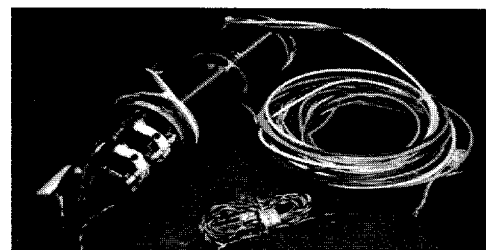


그림 5 제작된 매트릭스형 한류기의 리액터와 여기에 장착된 초전도체의 사진  
Fig. 5 Photograph of matrix-type SFCL and mounted superconductors

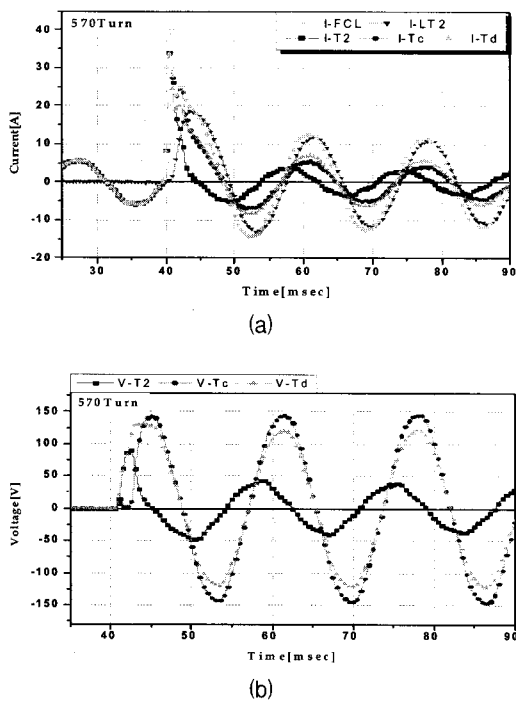


그림 6 제작된 매트릭스형 한류기의 고장전류 및 전압 제한특성  
 (a) 고장전류 제한 곡선 (b) 고장전압 제한 곡선  
 Fig. 6 Characteristics of fault current and voltage limiting for constructed matrix-type SFCL  
 (a) curve for fault current (b) curve for fault voltage

4. 결 론

이 논문에서 저자들은 전자기적 해석도구를 이용 매트릭스형 초전도 한류기의 핵심 소자인 자장 발생 리액터의 최적설계를 수행하였다. 리액터 구조에 따른 리액터 내부의 자속 밀도의 분포를 계산하여 리액터 안에 장착될 트리거 부와 전류제한 부 초전도 소자의 최적 위치를 설정하였다. 또한 리액터 간 이격거리에 따른 리액터 내부와 외부의 자속밀도를 계산하여 최적 이격거리를 도출하였다. 이러한 최적 설계를 바탕으로 매트릭스형 한류기를 설계, 제작하고 특성 분석을 하였다. 실험결과를 토대로 분석해볼 때 적절한 자속 밀도 분포로 인한 동시 켄치 특성의 향상으로 각 상에서의 고장전류가 적절히 분배되고 있음을 확인하였다. 향후 이러한 리액터의 최적 설계를 바탕으로 고장전류가 삼상에서 동시에 발생할 경우, 매트릭스형 한류기를 설계하는데 매우 유용할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 우석대학교 학술연구비 지원에 의해서 이루어졌으며 이에 감사를 표하는 바입니다.

참 고 문 헌

[1] M. Noe, K.P. Juengst, S. Elschner, J. Bock, F. Breuer, R. Kreutz, M. Kleimaier, K.H. Weck, N. Hayakawa, "High voltage design, requirements and tests of a 10

MVA superconducting fault current limiter," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.2082-2085, 2005

[2] 김향곤, 최충석, 김동욱, 최효상, "비닐절연선의 산화물 성장특성과 화재조사에의 적용", 전기학회 논문지 P권, vol. 56, no. 1, pp.37-44, 2007.  
 [3] 조용선, 박형민, 정수복, 최효상, "2차권선의 연결방법에 따른 변압기형 초전도 한류기 특성", 전기학회 논문지 P권, vol. 52, no. 12, pp.2078~3083, 2007.  
 [4] 조용선, 정병익, 최효상, "1\*3 행렬구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기의 자장유무에 따른 켄치특성 분석," 전기학회 논문지 P권, vol. 57, no. 3, pp.343~348, 2008.  
 [5] D. C. Chung, H.S. Choi, N.Y. Lee, G.Y. Nam, Y.S. Cho, T.H. Sung, Y.H. Han, B.S. Kim, S.H. Lim, "Optimum design of matrix fault current limiters using the series resistance connected with shunt coil," Physica C, Vol. 463-465, p1193-1197, 2007  
 [6] H. S. Choi and Y. S. Cho, "Critical current equalization via neutral lines in a transformer-type SFCL", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, pp. 736-733, 2008  
 [7] 산업자원부, "10kVA급 매트릭스형 초전도 한류기 개발 (연구보고서)", 2008

저 자 소 개



정 동 철 (鄭 東 哲)

1967년 8월20일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2000년 ~ 현재, 우석대학교 전기전자공학과 교수.  
 관심분야 : 초전도 한류기, 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 무선전력전송



윤 창 훈 (尹 暢 焄)

1962년 7월 8일 생, 1985년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1998년 ~ 현재, 우석대학교 전기전자공학과 교수.  
 관심분야 : 집적회로설계, 리액터 설계.



최 효 상 (崔 孝 祥)

1966년 2월 21일 생, 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). ~2003년 한전 전력연구원 선임연구원. 현재 조선대학교 전기공학과 교수.  
 관심분야 : 초전도 한류기, 초전도 전력기기