ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 66, No. 8, pp. 1163~1171, 2017
http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.8.1163

Python을 이용한 유전 알고리즘 기반의 수도권 고장전류 저감을 위한 BTB HVDC 최적 위치 선정 기법에 관한 연구

A Study on Selecting the Optimal Location of BTB HVDC for Reducing Fault Current in Metropolitan Regions Based on Genetic Algorithm Using Python

송 민 석* · 김 학 만* · 이 병 하†
(Min-Seok Song · Hak-Man Kim · Byung Ha Lee)

Abstract - The problem of fault current to exceed the rated capacity of a power circuit breaker can cause a serious accident to hurt the reliability of the power system. In order to solve this issue, current limiting reactors and circuit breakers with increased capacity are utilized but these solutions have some technical limitations. Back-to-back high voltage direct current(BTB HVDC) may be applied for reducing the fault current. When BTB HVDCs are installed for reduction in fault current, selecting the optimal location of the BTB HVDC without causing overload of line power becomes a key point. In this paper, we use genetic algorithm to find optimal location effectively in a short time. We propose a new methodology for determining the BTB HVDC optimal location to reduce fault current without causing overload of line power in metropolitan areas. Also, the procedure of performing the calculation of fault current and line power flow by PSS/E is carried out automatically using Python. It is shown that this optimization methodology can be applied effectively for determining the BTB HVDC optimal location to reduce fault current without causing overload of line power by a case study.

Key Words : Reducing fault current, BTB HVDC, Genetic algorithm, Optimal location, Overload of line power, Python, Power system

1. 서 론

전력은 현대사회에 필수 불가결한 에너지원인 만큼, 양질의 전력을 안정적으로 공급하는 것은 전력회사의 주요 목표이며, 고장이 발생하더라도 신속히 대처하여 정전 피해를 최대한으로 줄이고 신뢰성 있게 전력을 공급하는 것은 전력회사에서는 가장 중요한 업무로 고려되어야 한다. 전력계통은 자연에 노출되어 있고 수많은 종류의 기기와 선로들로 구성되어있으므로, 기기 절연, 과전압 또는 다른 기계적 요인 혹은 기상 조건에 의해 주어진 확률 범위 내의 고장발생은 불가피하다. 수도권지역에 과밀한 전력부하가 집중되어 있어서 부기간 송전선로인 154kV 송전선로의 상당한 송전선로가 열용량에 가깝게 운전되고 있고, 기간 송전망인 345kV 송전선로가 평상시 공급여력확보에는 유리하지만 고장시에는 고장전류를 증가시키는 다중루프계통으로 구성되어 있어서 사고발생 시 계통 고장용량의 증가 문제가 현안문제로 대두되고 있다. 어쩔 수 없는 원인으로 사고가 발생할 시에는 대량의 고장전류가 흐를 수 있는데, 이러한 고장을 적시에 제거하여 전력공급의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 고장전류의 크기를 미리 예측한 후 충분한 차단 용량의 차단기를 설치하거나 고장전류를 정격차단용량이하로 줄이는 것이 요구된다. 국내계통의 경우 2회선 환상망 구조로 구성된 수도권 지역의 전원집중으로 인한 고장전류 문제가 대두되고 있다[1]-[3].

이러한 고장전류의 문제를 해결하기 위해 모선 및 선로의 분리나 한류리액터 설치와 차단기 용량 증대 등의 조치를 취할 수 있으나 여전히 미흡한 점들이 있으며, 이들 조치 외에 수도권 지역의 고장전류 저감을 목적으로 BTB HVDC(Back to back High Voltage Direct Current)를 적용할 수 있다. BTB HVDC와 관련된 연구로서 BTB HVDC의 특성과 설치시의 영향과 BTB HVDC의 효과적인 운영방안 등에 대하여 활발히 연구가 수행되어 오고 있다[4]-[10]. 또한, 최적화 기법으로서 자연세계에서의 생물체는 자신의 처한 다양한 환경 속에서 적응력이 높을수록 살아남을 수 있다는 적자생존 이론에 바탕을 둔 유전 알고리즘에 대하여 수많은 연구가 최근까지도 수행되어 오고 있다[11]-[17].

수도권 지역의 고장전류 저감을 목적으로 BTB HVDC를 적용하기 위해서는 선로의 과부하를 초래하지 않으면서 고장전류를 최소화하는 최적의 위치선정이 중요한 문제가 되므로, 본 논문에서는 이를 효과적으로 결정하는 방안에 대하여 연구를 수행한다. 선로의 과부하를 초래하지 않으면서 고장전류를 최소화하는 BTB HVDC의 최적 위치를 선정하기 위해서는 수많은 케이스의 실계통 고장전류계산과 과부하선로계산을 수행해야 하는데, 이를 수작업으로 수행하는 것은 너무나 많은 시간과 노력이 요구된다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Incheon National University
E-mail : bhlee@inu.ac.kr
* Dept. of Electrical Engineering, Incheon National University
Received : May 29, 2017; Accepted : July 12, 2017

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이러한 점을 고려하여 최적해를 구하는 알고리즘으로 전역적 해를 찾는 성능을 인정받아 다양한 분야에서 응용이 이루어지고 있는 유전 알고리즘을 적용하고, Python 프로그램을 이용하여 PSS/E에 의한 고장전류계산과 선로과부하계산을 계획한 절차대로 효율적으로 계산하도록 자동화한다. 이와 함께 선로의 과부하를 초래하지 않으면서 고장전류를 최소화하는 BTB HVDC의 최적 위치를 선정하는 유전 알고리즘 기반의 새로운 기법을 제안한다. 이 기법을 한전 계통 계획에 적용된 실계통 시스템에 적용하여 제안된 BTB HVDC 최적위치 선정 기법이 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

2. 유전알고리즘을 활용한 고장전류 저감을 위한 HVDC 최적위치 선정 기법

2.1 고장전류 계산

전력계통에서의 3상 지락 및 3상 단락과 같은 3상 평형고장은 빈번하게 발생하지 않지만 전력계통에 심각한 영향을 미치기 때문에 국내 전력계통의 고장전류 검토 시에는 3상 단락고장을 기본으로 적용하고 있다. 본 논문에서도 고장전류는 고장전류 계산 시에 가장 널리 활용되는 3상 단락시의 고장전류로 계산한다.

전력시스템 해석을 위하여 세계적으로 널리 사용되고 있는 PSS/E 프로그램에는 고장 전류 계산 패키지들이 제공되고 있는데, 국내 전력계통 운영부서에서도 많이 활용하고 있는 ASCC (Auto Sequencing Short Circuit Calculation)를 사용한다. ASCC는 고전적인 고장계산기법에 기반하고 있으며 모든 모선 고장에 대해 표준고장을 자동적으로 계산한다는 특징이 있다. 이 패키지는 DC 고장전류 성분을 고려하지 않은 차과도 대칭전류 값을 제공하며, 사용 시에는 다양한 옵션에 대한 설정을 필요로 한다[18].

2.2 유전 알고리즘의 연산

유전 알고리즘은 1975년에 존 홀랜드(John Holland)에 의해 개발되었으며, 최적화 문제를 해결하는 기법 중 하나이다. 이는 자연세계의 진화과정에 기초를 두고 있으며, 생물체는 자신의 처한 다양한 환경 속에서 적응력이 높을수록 살아 남을 수 있다는 다윈의 적자생존 이론을 바탕으로 한다[11]. 유전 알고리즘의 연산은 초기화(Initialize), 선택(Selection), 교차(Crossover), 변이(Mutation), 대치(Replace), 반복(Loop)과 같이 6단계 과정이 있다[13].

유전 알고리즘의 초기화 단계는 유전자를 통해 염색체를 구성하는 단계이다. 이때 유전자는 염색체를 구성하는 하나의 값으로 각 유전정보를 가지고 있어야 한다. 선택 연산은 유전 알고리즘 성능에 큰 영향을 미친다. 이 과정에서 이전 세대에서 다음 세대로 넘어갈 유전자를 선택하는 과정이 이루어진다. 선택을 하는 방법은 균등 비례 룰렛 휠 선택(Roulette Wheel Selection), 토너먼트 선택, 순위 기반 선택 등이 있다. 균등 비례 룰렛 휠 선택 방법은 해집단의 크기를 유지하면서 평균 적합도를 높이는 방법이다. 룰렛 휠 선택 구간의 넓이는 적합도 함수에 따른 각 염색체의 적합도 비율을 의미하며, 룰렛 휠 선택 구간의 크기에 따라 다음세대의 부모염색체로 선정될 적합성이 조절되어, 다음세대에 적합성이 높은 염색체를 부모염색체로 사용하는 가능성이 커지게 된다. 생명체가 세대 내에서 교배를 통해 다음 세대를 생성하는 것처럼 유전 알고리즘 또한 이와 같은 교차 연산 과정을 거친다. 염색체를 서로 교환하여 새로운 염색체의 조합을 얻는 교차 연산 과정을 통해 두 개의 부모염색체로부터 한 개의 자식 염색체가 만들어진다.

생명체는 교배로 인한 변화 이외에도 변이라는 과정을 통해 주변 환경에 적응한다. 유전 알고리즘을 통한 연산을 할 때 선택과 교차과정만 적용하면 해집단이 정체될 수 있기 때문에 변이라는 연산을 이용한다. 변이의 역할은 알고리즘이 최적점에 갇히지 않도록 보장하는 역할과 해집단의 다양성을 높여주는 역할을 한다[11]. 변이 연산은 전형적인 변이와 비균등 변이가 있다. 전형적인 변이는 난수를 발생시키는 방법이며, 비균등 변이는 유전 알고리즘이 진행됨에 따라 점점 변이의 강도를 줄여가는 방법이다.

대치는 선택, 교차, 변이를 통해 만들어진 새로운 염색체를 기존의 해집단에 추가하는 과정이다[11]. 이 과정을 통해 품질이 나쁜 염색체는 품질이 좋은 염색체로 대체되어 해집단의 품질이 전체적으로 좋아지게 된다.

반복 단계는 정해진 세대 수 만큼 선택, 교차, 변이, 대치를 반복하는 단계이다. 이때 최적조건에 만족하는 세대가 앞서 정해진 세대 수 보다 먼저 나올 경우 앞서 정해진 세대 수 만큼 반복 단계를 거치지 않아도 된다.

유전알고리즘은 다수의 임의의 변수를 통해 최적해를 찾을 수 있고, 로컬 최적화를 피해갈 수 있으며, 빠른 시간 내에 해를 찾을 수 있는 장점이 있으며[14], 최적위치 선정에도 널리 사용되고 있다. 이와 같은 장점을 고려하여 수도권 지역의 154kV선로 중 BTB HVDC를 설치하기 위한 최적위치를 선정하는 데에 전역 최적화 알고리즘으로 유전알고리즘을 사용한다.

3. Python을 활용한 최적위치 선정 알고리즘

3.1 Python을 활용한 PSS/E 프로그램의 실행을 통한 BTB HVDC의 최적 위치 선정 절차

수도권 지역의 154kV 계통은 매우 복잡하게 구성되어 있고, 그 선로 수 또한 매우 많기 때문에 PSS/E 고장계산 패키지를 이용하여 수동적으로 고장전류 저감을 위한 BTB HVDC의 최적위치를 선정하는 것은 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 그러므로 PSS/E 실행을 자동화시켜 고장계산 결과 값을 도출할 수 있는 방법이 필요하다. PSS/E의 API(Application Program Interface) 기능의 경우 Python과 호환이 가능하여 PSS/E 데이터와 API를 이용한 다양한 계산 결과값을 Python의 IDLE(Python GUI)를 통해 나타낼 수 있으므로[19], Python을 이용하여 PSS/E의 명령어들을 수행하는 프로그램을 배치파일 형태로 만들어 수작업으로

일일이 수행해야 할 PSS/E의 실행작업들을 자동화 시킬 수 있다. 이러한 이유로 본 논문에서는 Python을 이용하여 PSS/E로부터 필요한 정보를 받아 유전 알고리즘 기반의 BTB HVDC 최적위치를 선정하는 기법을 설계하였다.

제시하는 기법의 절차를 설명하면, 먼저 수도권 고장전류 저감을 위한 BTB HVDC 최적위치를 선정하는 수행 과정으로서 최적해를 구하는 데 걸리는 시간과 수렴속도 등을 고려하여 유전 알고리즘을 적용할 적정한 세대수를 결정한다. 계통 데이터의 정보를 입력하고 초기의 집단을 생성한다. 집단의 각 요소에 대하여 고장전류와 과부하 선로를 계산하고, 적합도 함수에 근거하여 룰렛 휠을 통한 BTB HVDC 설치 조합의 집단을 선택한다. 이 선택된 집단에 대하여 교차율에 의한 교차 연산 실행으로 교배를 수행하고, 돌연변이율에 따라 돌연변이 연산을 수행하고, 해 집단의 품질이 전체적으로 좋아지도록 대치 연산을 실행한다.

결과로 도출된 집단에 대하여 고장전류와 과부하 선로를 계산하고, 적합도 함수에 근거하여 평가를 하여 최적해를 갖는 조합이 해 집단에 있는지를 체크한다. 최적해가 있으면 BTB HVDC를 설치하는 개소가 정해져서 BTB HVDC의 최적 위치가 선정되게 된다. 해 집단에 최적해를 갖는 조합이 없는 경우에는, 검토한 세대가 검토하기로 한 세대수보다 적으면 현재까지의 발생된 집단 중에서 나은 조합들로 구성된 개선된 집단을 생성하고, 유전자 알고리즘에 의하여 더 개선된 다음 세대를 구하기 위한 과정을 되풀이 한다. 이에 반하여 검토한 세대가 검토하기로 한 세대수보다 같거나 많으면 최적조건을 만족하는 해를 현 조건하에서는 구할 수 없으므로 문제를 재설정하기 위해 종료한다.

그림 1은 Python과 PSS/E 프로그램을 사용하여 유전 알고리즘 기반의 BTB HVDC 최적위치를 선정하는 수행과정을 나타낸 것이다.

3.2 BTB HVDC 최적위치 선정을 위한 유전알고리즘 적용 기법

3.2.1 염색체 생성

초기화 단계에는 유전알고리즘을 수행하기 위하여 임의의 초기 염색체 집단을 생성한다. 본 논문에서는 수도권 지역의 고장전류 저감을 위한 BTB HVDC의 최적 설치위치를 선정하는 것이 목적으로서 설치할 BTB HVDC는 현재의 국내 BTB HVDC의 국산화 개발 수준 등을 고려하여 154kV 송전선로에 설치하는 것으로 한다. 이점을 고려하여, 수도권 지역의 154kV 모선과 연결된 선로 중 R개의 선로를 동시에 선택하여 R기의 BTB HVDC를 설치하는 방안에 대한 염색체를 생성한다. 즉, 수도권 지역의 154kV 모선에 연결된 선로를 유전자로 가정하고, 154kV 모선에 연결된 선로를 배열로 표현한 후 배열로 표현된 선로 중 임의적으로 R개를 뽑아 염색체를 생성하고, 해집단(Population) 수에 따라 부모염색체수를 결정한다. 그림 2는 수도권 지역의 154kV 모선에 연결된 선로를 배열로 표현한 후 R기의 BTB HVDC를 설치하는 방안과 관련한 염색체를 생성하는 과정을 나타낸 것이다.

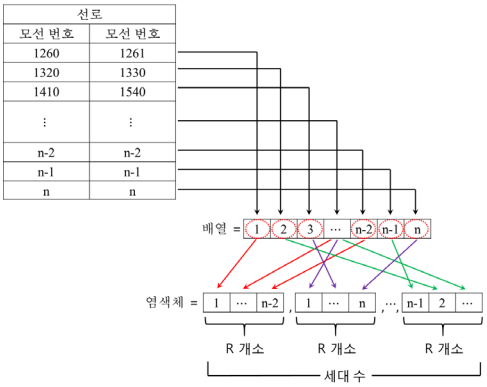

그림 2 유전알고리즘의 염색체 생성

Fig. 2 Generation of chromosomes for genetic algorithm

3.2.2 적합도 함수

염색체에 해당하는 선로 위치가 고장전류 저감을 위한 BTB HVDC의 최적위치인지에 대한 여부는 적합도 함수를 이용하여 평가될 수 있다. 3상 단락전류는 ASCC 패키지를 통해 계산된다. 적합함수에 차단용량만을 고려하여 차단용량을 최소화하는 최적해를 구하는 경우 차단용량을 최소화하는 해는 더 빠르고 쉽게 구할 수 있으나, 이때에는 과부하선로가 발생하여 실제 적용을 할 수 없는 해도 발생할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 점을 감안하여 과부하선로가 발생하지 않으면서 차단용량을 최소화하기 위한 적합도 함수를 제시한다. 수도권 지역의 154kV 모선에 연결된 선로에 BTB HVDC 투입하여 고장전류 초과 모선의 개수 및 과부하 선로의 개수 감소시키는 것을 목적으로 고장전류 초과 모선과 과부하 선로의 개수를 적합도 함수에 포함시키고 해의 수렴성을 고려하여 고장전류 초과 모선과 과부하 선로의 개수에 대하여 조정 가능한 가중치를 부가한다. 식 (1)에 사용된 적합도 함수가 제시되어 있다. 차단기 용량 초과 모선 개수는 BTB HVDC 적용 후 모선의 고장전류의 크기가 각 모선의 차단기 용량을 초과하는 모선의 개수를 의미한다. 또한, 과부하 발생 선로 개수는 각 선로의 피상전력이 각 선로의 정격용량을 초과하는 선로의 개수를 의미한다. 식 (1)은 가중치에 따른 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수를 더한 분모의 값이 클수록 적합도가 떨어지게 된다. 차단기 용량을 초과한 모선 개수와 과부하 발생 선로 수가 없는 경우가 최적의 해가 되는 것이며 이 때 분모가 영이 되면 안 되므로, 이를 방지하기 위하여 분모에 +1을 대입하였다.

$$Fitness\ function = \frac{1}{B_n \cdot W_1 + O_n \cdot W_2 + 1} \tag{1}$$

여기서 B_n : 차단기용량 초과 모선 개수

O_n : 과부하 발생 선로 개수

W_1 : 차단기용량 초과 모선 개수에 대한 가중치

W_2 : 과부하 발생 선로 개수에 대한 가중치

식 (1)의 적합도 함수를 적용하여 선로의 과부하를 초래하지 않으면서 고장전류를 최소화하는 유전 알고리즘을 구현하게 된다. 차단기 용량 초과 모선 개수에 대한 가중치(W_1)와 과부하 발생 선로 개수에 대한 가중치(W_2)는 최적해로의 수렴특성을 고려하여 적절히 선정되어야 하며, 다음 장에서 이에 대하여 검토한다.

4. 적용 시스템 및 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건 및 적용 시스템

수도권 지역에 설치할 BTB HVDC는 현재의 국내 BTB HVDC의 국산화 개발 수준 등을 고려하여 154kV 송전선로에 설치하는 것으로 하고, 적용하는 BTB HVDC의 용량은 154kV 선로 용량 및 관련 기술 수준을 고려하여 200MW로 선정하였다. 수도권 지역 BTB HVDC 최적위치 선정 기법의 효과를 검증하기 위하여 2023년 peak 시의 계통계획 데이터를 활용하였고, 2023년 peak 부하는 100.97[GW]이다. 고려하는 2023년 peak 데이터의 경우 고장전류 검토결과 차단기 용량을 초과하는 것으로 나타난 수도권 지역 154kV 모선은 표 1에 제시되어 있다.

BTB HVDC 최적위치 선정과 관련하여 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수에 대한 가중치, 교차율, 변이율 등의 매개변수가 최적해 수렴에 미치는 영향을 확인하고 적합한 값을 적용하기 위하여 케이스 별로 여러 가지의 값을 부여하여 시뮬레이션을 수행한다. 유전알고리즘은 파라미터의 값에 따라서 전역최적해로 수렴하지 않을 수도 있고 진동할 수도 있으므로 이러한 점을 유의하되, 여기서는 파라미터의 값의 최적치를 구하는 것이 목적이 아니라 고장전류를 최소화하는 최적의 BTB HVDC 설치위치를 선정하는 것이 주목적이므로 고장전류를 최소화하는 최적의 BTB HVDC 설치위치를 어느 정도의 수준 내에서 정확히 도출해 내면 적절한 파라미터의 값으로 선정된 것으로 한다.

염색체 생성은 그림 2에서와 같이 수행하게 되는데, 먼저 R개

표 1 차단기 용량을 초과한 수도권 지역 154kV 모선
Table 1 154 kV buses to exceed the rated capacity of the power circuit breaker

모선번호	정격차단용량[kA]	고장전류[kA]
3320	50	51.733
3330	50	51.663
3416	50	51.811
3460	50	53.808
3810	50	58.233
3811	50	57.239
3815	50	53.65
3895	50	52.878
1310	50	51.241
1410	50	50.24
1710	50	51.814
1930	50	52.327
4760	50	50.962

소를 1개소, 즉 BTB HVDC를 설치하는 개소를 1개소 설치하는 것부터 시작한다. 설치 개소를 1개소부터 계속 늘려 3개소까지 설치하는 방안에 대하여 검토하여 차단기설비 기준 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합이 최소가 되는, 즉 영이 되는 것을 목표로 하는 최적해를 구하였으나, BTB HVDC를 3개소에 설치하는 방안까지는 차단기설비 기준 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수가 모두 영이 되는 방안을 찾을 수 없었다. 따라서, 아래에서는 BTB HVDC를 4개소에 설치하는 방안을 검토한다.

BTB HVDC를 4개소에 설치하는 방안을 검토하면서, 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수에 대한 가중치의 매개변수가 최적해 수렴에 미치는 영향을 확인하기 위하여 고려한 몇 가지의 케이스가 표 2에 제시되어 있다.

또, 변이 연산은 전형적인 변이를 사용하며, 교차율과 변이율의 매개변수가 최적해 수렴에 미치는 영향을 확인하기 위하여 고려한 여러 가지의 케이스가 표 3에 제시되어 있다.

표 2 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수에 대한 가중치 별 케이스
Table 2 Cases according to the values of weighting parameters of the number of buses to exceed the rated capacity of the breaker and that to cause overload

케이스 1	가중치	
	고장 전류(W1)	과부하(W2)
Case 1-1	0.8	0.2
Case 1-2	0.5	0.5
Case 1-3	0.2	0.8

표 3 교차율과 변이율 별 케이스
Table 3 Cases according to the values of crossover and mutation

케이스 2	고정 값			변동 값	
	세대 수	염색체 구성 개수	염색체 집단 수	교차 율 [%]	변이 율 [%]
Case 2-1	30	4	100	70	20
Case 2-2	30	4	100	70	30
Case 2-3	30	4	100	70	40
Case 2-4	30	4	100	80	20
Case 2-5	30	4	100	80	30
Case 2-6	30	4	100	80	40
Case 2-7	30	4	100	90	20
Case 2-8	30	4	100	90	30
Case 2-9	30	4	100	90	40

4.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 세대 수는 모든 케이스에 대하여 30세대까지만 고려한다. 또한, 매 세대별 차단기 용량 초과 모선의 개수, 과

부하 선로 개수, 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 선로수의 합, 적합도 함수에 따른 적합도, 차단기 용량 초과 용량, 선로용량 초과 용량 등을 비교한다.

4.2.1. 케이스 1에 대한 결과(차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수에 대한 가중치에 따른 결과 비교)

교차율은 0.8, 변이율은 0.3의 값을 적용하며, 이에 대한 검토는 다음 절에서 수행한다. 그림 3은 Case 1-1의 시뮬레이션 결과 값을 나타낸 것이다. 가로축은 세대수로서 유전 알고리즘으로 최적해를 찾아가는 진화의 단계수를 의미한다. 세로축은 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합을 나타낸다. 이 값이 영이 되면 최적해에 도달한 것이 되며, 이 값이 영이 되는 세대가 최적해에 도달한 세대가 된다. 그림 3을 보면, BTB HVDC 적용 위치에 따른 매 세대별 차단기 용량을 초과한 모선의 수가 점차적으로 감소하였지만, 30세대까지 차단기 용량을 초과한 모선과 과부하 선로의 개수의 합이 1개 존재하는 것을 확인 할 수 있고, 이는 30세대까지 최적해에 도달하지 못하였다는 것을 나타낸다.

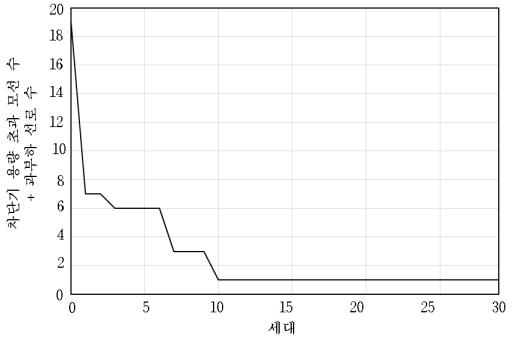

그림 3 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합(Case 1-1)

Fig. 3 Sum of the numbers of buses to exceed the rated capacity of the breaker and those to cause overload (Case 1-1)

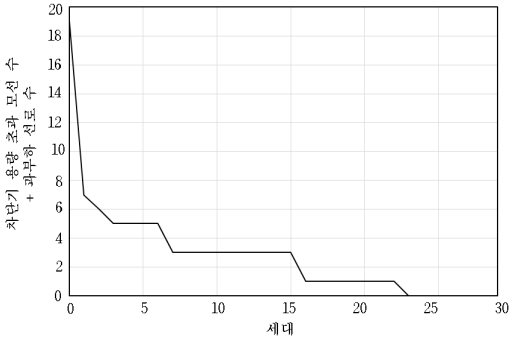

그림 4 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합(Case 1-2)

Fig. 4 Sum of the numbers of buses to exceed the rated capacity of the breaker and those to cause overload (Case 1-2)

그림 4는 Case 1-2의 시뮬레이션 결과 값을 나타낸 것이다. 그림 4를 보면 BTB HVDC 적용 위치에 따른 매 세대별 차단기 용량을 초과한 모선의 수가 점차적으로 감소하여 23세대를 지난 이후부터는 차단기 용량을 초과한 모선수와 과부하 선로의 개수의 합이 영으로 되어 차단기 용량을 초과한 모선이나 과부하 선로가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 23세대에서 최적해에 도달하였다는 것을 나타낸다.

그림 5는 Case 1-3의 시뮬레이션 결과 값을 나타낸 것이다. 그림 5를 보면, BTB HVDC 위치에 따른 매 세대별 차단기 용량을 초과한 모선의 수가 감소하여 20세대 전에 1개까지 줄어들었지만, 더 이상 줄어들지 못하고 30세대까지 차단기 용량을 초과한 모선과 과부하 선로의 개수의 합이 1개 존재하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 30세대까지 최적해에 도달하지 못하였다는 것을 나타낸다.

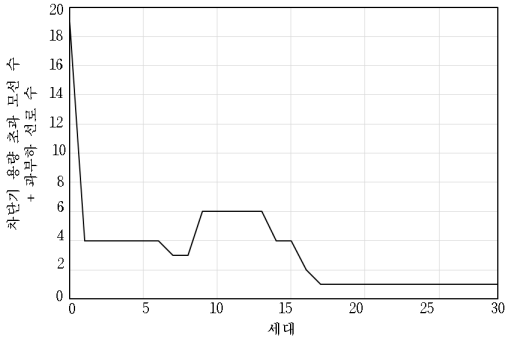

그림 5 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합(Case 1-3)

Fig. 5 Sum of the numbers of buses to exceed the rated capacity of the breaker and those to cause overload (Case 1-3)

이 실행결과로서 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수에 대한 가중치 따른 효과를 비교해 보면, BTB HVDC 최적위치 선정과 관련하여 Case 1-2의 경우에서만 차단용량 초과 모선과 과부하 선로가 발생하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 이를 고려하여 최적해로 적절히 수렴토록 하기 위하여 차단용량 초과 모선 개수의 가중치로 0.5, 과부하 선로 개수의 가중치로 0.5를 적용하여 서로 동일한 값으로 선택한다.

4.2.2. 케이스 2에 대한 결과(교차율과 변이율에 따른 결과 비교)

가) 교차율에 따른 결과 비교

교차율이 BTB HVDC 최적위치 선정에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Case 2-1, Case 2-4, Case 2-7과 Case 2-2, Case

2-5, Case 2-8과 Case 2-3, Case 2-6, Case 2-9에 대한 결과를 비교한다. 그림 6은 서로 다른 교차율이 적용된 Case 2-1, Case 2-4, Case 2-7에 대한 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 차단기 용량을 초과한 모선수와 과부하 선로의 개수의 합이 세대수가 30으로 증가하여도 영으로 되지 않으므로 주어진 세대수 내에 최적위치를 선정한 케이스는 없음을 알 수 있다.

그림 7은 서로 다른 교차율이 적용된 Case 2-2, Case 2-5, Case 2-8에 대한 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합을 비교하여 나타낸 것이다. Case 2-5의 경우 교차율이 높아 염색체의 수도권 지역의 154kV 선로가 다른 염색체의 수도권 지역의 154kV 선로와 교차될 확률이 높아 최적위치에 도달하는 수렴속도가 가장 빠른 것을 확인할 수 있다. Case 2-8의 경우 Case 2-5의 경우보다 교차율이 높음에도 불구하고 수렴속

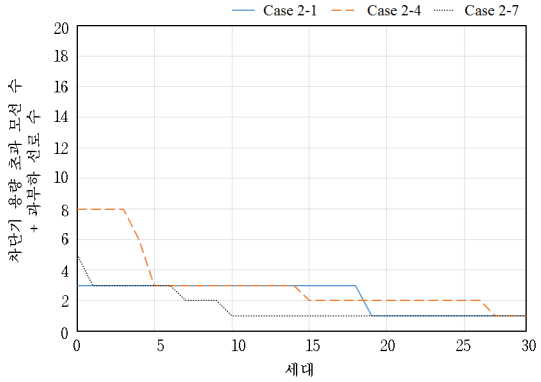

그림 6 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합 비교(Case2-1, Case2-4, Case2-7)

Fig. 6 Comparison of sums of the numbers of buses to exceed the rated capacity of the breaker and those to cause overload(Case2-1, Case2-4, Case2-7)

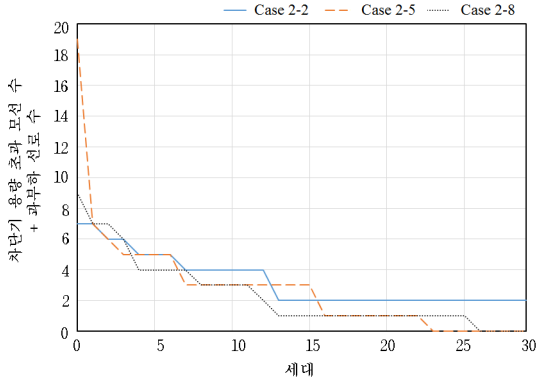

그림 7 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합 비교(Case2-2, Case2-5, Case2-8)

Fig. 7 Comparison of sums of the numbers of buses to exceed the rated capacity of the breaker and those to cause overload(Case2-2, Case2-5, Case2-8)

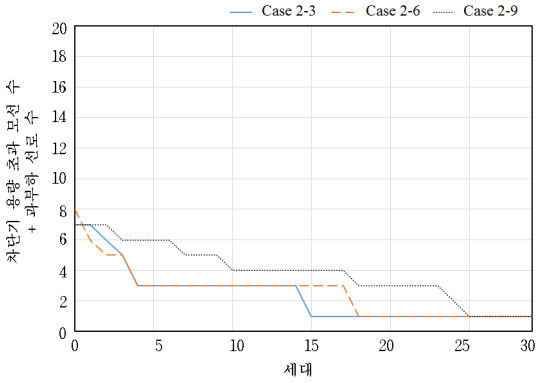

그림 8 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합 비교(Case2-3, Case2-6, Case2-9)

Fig. 8 Comparison of sums of the numbers of buses to exceed the rated capacity of the breaker and those to cause overload(Case2-3, Case2-6, Case2-9)

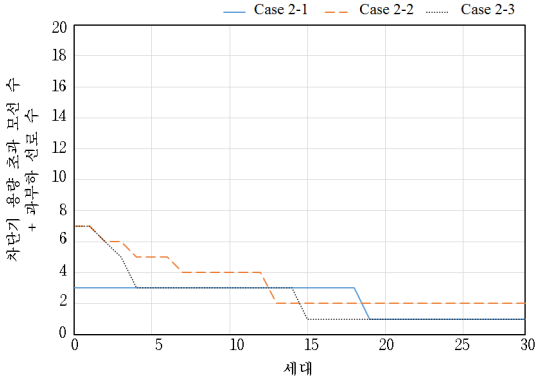

그림 9 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합 비교(Case2-1, Case2-2, Case2-3)

Fig. 9 Comparison of sums of the numbers of buses to exceed the rated capacity of the breaker and those to cause overload(Case2-1, Case2-2, Case2-3)

도가 느린 이유는 교배과정에서 필요 이상으로 교배가 되어 최적위치에 수렴하는데 느려진 것으로 보인다.

그림 8은 서로 다른 교차율이 적용된 Case 2-3, Case 2-6, Case 2-9에 대한 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 세대수가 30으로 증가하여도 차단기 용량을 초과한 모선수와 과부하 선로의 개수의 합이 영으로 되지 않으므로 주어진 세대수 내에 최적위치를 선정한 케이스는 없음을 알 수 있다.

나) 변이율에 따른 결과비교

변이률이 BTB HVDC 최적위치 선정에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Case 2-1, Case 2-2, Case 2-3과 Case 2-4, Case 2-5, Case 2-6과 Case 2-7, Case 2-8, Case 2-9에 대한 결과를 비교한다. 그림 9는 서로 다른 변이율이 적용된 Case 2-1, Case

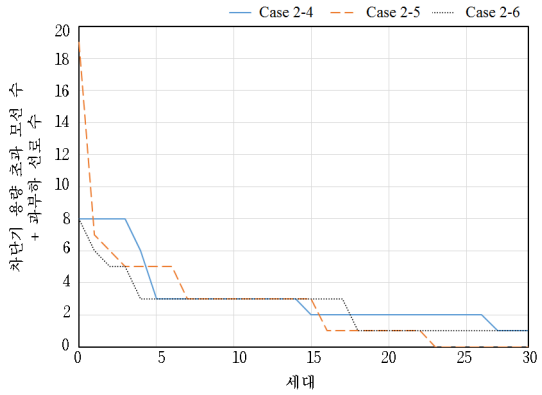

그림 10 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합 비교(Case2-4, Case2-5, Case2-6)

Fig. 10 Comparison of sums of the numbers of buses to exceed the rated capacity of the breaker and those to cause overload(Case2-4, Case2-5, Case2-6)

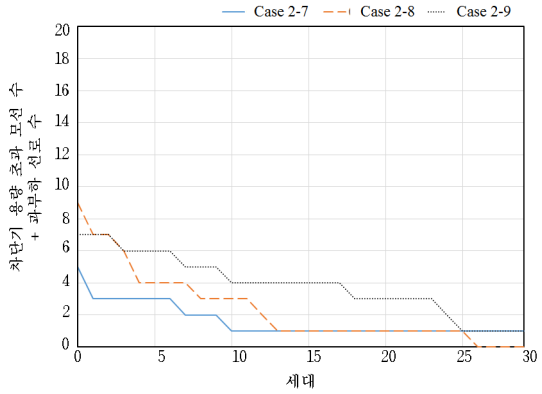

그림 11 차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합 비교(Case2-7, Case2-8, Case2-9)

Fig. 11 Comparison of sums of the numbers of buses to exceed the rated capacity of the breaker and those to cause overload(Case2-7, Case2-8, Case2-9)

2-2, Case 2-3에 대한 차단기 용량초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 9에서 알 수 있듯이 차단기 용량을 초과한 모선수와 과부하 선로의 개수의 합이 영으로 되지 않으므로 최적위치를 선정한 케이스는 없음을 알 수 있다.

그림 10은 서로 다른 변이율이 적용된 Case 2-4, Case 2-5, Case 2-6에 대한 차단기 용량초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 10에서 알 수 있듯이 Case 2-5의 경우 변이율이 낮아 최적해 에서 벗어나지 않는 범위 내에서 변위과정이 일어나 최적위치에 도달하는 수렴속도가 가장 빠른 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 서로 다른 변이율이 적용된 Case 2-7, Case 2-8, Case 2-9에 대한 차단기 용량초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수의 합을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 11에서 알 수 있듯이 Case 2-8의 경우 최적위치에 도달하였지만 Case 2-5보다는 늦은 것을 확인할 수 있다.

4.2.3 시뮬레이션 결과 정리

차단기 용량 초과 모선 개수와 과부하 발생 선로 개수에 대한 가중치에 따른 효과를 비교해 보면, BTB HVDC 최적위치 선정과 관련하여 Case 1-2의 경우에서만 차단용량 초과 모선과 과부하 선로가 발생하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 이를 고려하여 최적해로 적절히 수렴토록 하기 위하여 차단용량 초과 모선 개수의 가중치로 0.5, 과부하 선로 개수의 가중치로 0.5로서 서로 동일한 값으로 선택한다.

교차율, 변이율에 대한 케이스를 구분하여 시뮬레이션을 수행하여 결과를 비교해보면, BTB HVDC 최적위치 선정과 관련하여 Case 2-5, Case2-8의 경우에서만 차단용량 초과 모선과 과부하

표 4 Case 2-5에 대한 4개소의 BTB HVDC 최적설치 지점

Table 4 4 optimal locations of BTB HVDCs for case 2-5

No	설치 지점	
	From bus	To bus
BTB HVDC-1	1311(신파주1S)	1415(문발)
BTB HVDC-2	3320(임학)	3810(신부평1)
BTB HVDC-3	4165(남군포)	4620(산본)
BTB HVDC-4	4711(신용인1S)	4765(용인)

표 5 4개소에 BTB HVDC 설치 전, 후의 154kV 모선에서의 고장전류 시뮬레이션 결과

Table 5 Simulation results of fault currents at 154 kV buses before and after installation of BTB HVDCs at the 4 locations

모선 번호	고장 전류[kA]		
	BTB HVDC 설치 전	BTB HVDC 설치 후	변화량
3320	51.733	16.871	34.862
3330	51.663	37.173	14.49
3416	51.811	40.334	11.477
3460	53.808	41.456	12.352
3810	58.233	44.276	13.957
3811	57.239	43.7	13.539
3815	53.65	41.819	11.831
3895	52.878	41.115	11.763
1310	51.241	49.029	2.212
1410	50.24	49.923	0.317
1710	51.814	48.157	3.657
1930	52.327	44.711	7.616
4760	50.962	47.169	3.793

선로가 발생하지 않았다. Case 2-5와 Case 2-8을 비교해본 결과 Case 2-5의 경우 Case 2-8보다 BTB HVDC 최적위치를 좀 더 빠른 세대에서 선정하였다. 즉, 차단용량 초과 모선 개수에 대한 가중치를 0.5, 과부하 선로 개수에 대한 가중치를 0.5, 교차율을 0.8, 변이율을 0.3으로 적용할 시에 적절하게 BTB HVDC 적용위치를 선정할 수 있었다.

수도권 지역의 고장전류 저감을 목적으로 BTB HVDC를 설치할 4개소의 최적설치 지점은 Case 2-5의 시뮬레이션 결과로서 제시할 수 있으며, 이 결과는 표 4와 같다. 표 4의 4개소에 BTB HVDC를 설치하였을 때, 위의 표 1에 제시된 차단기 용량을 초과한 수도권 지역 154kV 모선에 대한 BTB HVDC 설치 전·후의 고장전류 시뮬레이션 결과는 표 5에 제시되어 있다. 표 5를 보면 선택된 4개소에 BTB HVDC를 설치하였을 때 정격차단용량을 초과하는 고장전류는 발생하지 않음을 알 수 있다.

5. 결 론

환상망 구조로 구성된 수도권 지역의 전력계통망과 수도권 지역의 전원집중으로 인하여 이 지역의 고장전류 문제가 대두되고 있다. 이를 해결하기 위해 모선분리나 한류리액터 설치 및 차단기 용량 증대 등의 조치 외에 수도권 지역의 고장전류 저감을 목적으로 BTB HVDC를 적용할 수 있다. 고장전류 저감을 위해 BTB HVDC를 최적 위치에 설치하기 위해서는 선로의 과부하를 초래하지 않으면서 고장전류를 최소화하는 최적의 위치를 선정해야 하며, 수많은 케이스의 실계통 고장전류계산과 과부하선로계산을 수행해야 하는데, 이를 수작업으로 수행하는 것은 너무나 많은 시간과 노력이 요구된다.

본 논문에서는 이러한 점을 고려하여 최적해를 구하는 알고리즘으로 전역적 해를 찾는 성능을 인정받아 다양한 분야에서 응용이 이루어지고 있는 유전 알고리즘을 적용하고, Python 프로그램을 이용하여 PSS/E에 의한 고장전류계산과 선로과부하계산을 계획한 절차대로 자동화하여 효율적으로 계산하도록 하였다. 이와 함께 선로의 과부하를 초래하지 않으면서 고장전류를 최소화하는 BTB HVDC의 최적 위치를 선정하는 유전 알고리즘 기반의 새로운 적합도 함수에 의해 이 조건을 동시에 충족시키는 구현 기법을 제안하였다. 제안하는 유전알고리즘 설계시 적용되는 가중치, 교차율, 변이율 등의 매개변수에 따른 BTB HVDC 최적위치 선정 결과를 비교하여 매개변수의 영향을 분석하고, 적절한 매개변수의 값을 구하였다. 여기서 제안된 기법을 한전 계통 계획에 적용된 실계통 시스템에 적용하여, 고장전류 초과 모선 및 과부하 선로 개수를 감소시키기 위한 BTB HVDC의 최적 설치 개소를 선정하는 데에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여 주었다.

감사의 글

이 논문은 부분적으로 인천대학교 2016년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

[1] KPX, A Study on Policy Directions for the Promotion of Distributed District Heat and Power Generation, 2014.

[2] KISTEP, Development project of Multi-Terminal DC transmission and distribution system, 2015.

[3] KPX, A study on optimal mix plan of long-term metropolitan power network, 2015.

[4] F. Nikolas, G. A. Vassilios, and D. D. Georgios, "VSC-based HVDC Power Transmission Systems: An Overview", IEEE Trans. on Power Energy, Vol. 23, No. 3, pp. 592-602, 2009.

[5] G. Chunyi and Z. Chengyong, "Supply of an Entirely Passive AC Network Through a Double-Infeed HVDC System", IEEE Trans. on Power Energy, Vol. 24, pp. 2835-2841, 2010.

[6] P. Manohar, and K. K. Dutta, "Effect of SCFCL on the Performance of BTB-HVDC System" 1st In Electrical Energy Systems (ICEES), Newport Beach, United States of America, pp. 288-293, 2011.

[7] E. T. Raymundo, and M. Marta, "Offshore Wind Farm Grid Integration by VSC Technology With LCC-Based HVDC Transmission", IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol. 3, No. 4, pp. 899-907, 2012.

[8] C. Guo, C. Zhao, and X. Chen, "Analysis of Dual-Infeed HVDC with LCC-HVDC and VSC-HVDC", IEEE Power & Energy Society General Meeting Power Delivery, Vancouver, Canada, pp.1529-1537, 2013.

[9] S. S. Lee, and Y. T. Yoon, "VSC-HVDC Model-Based Power System Optimal Power Flow Algorithm and Analysis", IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, Canada, pp.1-5, 2013.

[10] N. Rehan, S. C. Muhammad, A. Maaz, A. H. Saad and T. S. Umar, "Impact of HVDC Grid Segmentation Topology on Transient Stability of HVDC-Segmented Electric Grid", IEEE International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST), Lahore, Pakistan, pp.132-136, 2015.

[11] D. E. Goldberg, Genetic algorithms in search optimization and machine learning, Addison-wesley, Canada, 1989.

[12] G. Liu, J. Zhang, R. Gao, and Y. Sun, "A Coarse- Grained Genetic Algorithm for the Optimal Design of the Flexible Multi-body Model Vehicle Suspensions Based on Skeletons Implementing", First In Intelligent Networks and Intelligent Systems, Wuhan, China, pp. 139-142, 2008.

[13] J. Cheng, and Y. Yang, "Application of hybrid genetic algorithm in optimization formula system", 2nd In Education Technology and Computer (ICETC), Shanghai,

China, Vol. 4, pp. 130-134, 2010.
[14] P. Guo, X. Wang, and Y. Han, "The enhanced genetic algorithms for the optimization design", 3rd International Conference on In Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), Yantai, China, Vol. 7, pp. 2990-2994, 2010.
[15] W. Sheng, K.Y. Liu, Y. Liu, X. Meng, Y. Li, "Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation via an Improved Nondominated Sorting Genetic Algorithm II", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, pp. 569-578, 2015.
[16] L. Zhang, K. Zhang, G. Zhang, "Power distribution system reconfiguration based on genetic algorithm", 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), pp. 80-84, 2016.
[17] Z. Zhang, J. Liang, X. Wang, R. Ye, Z. Lin, "Transmission network including VSC-HVDC expansion planning based on genetic algorithm with shift operation", 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 722-726, 2016.
[18] KPX, Establishment of fault current analysis standard of power systems, 2013.
[19] M. U. Khalid, F. Rashid, W. Akhtar, M. H. Ghauri, and O. LATEEF, Python Based Power System Automation in PSS/E, Lulu. com, 2014.

저 자 소 개

송 민 석 (Min-Seok Song)

2015년 인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2017년 동 대학교 전기공학과 석사 졸업

E-mail : alstjr2111@naver.com

김 학 만 (Hak-Man Kim)

1998년 성균관대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학박사), 2011년 일본 Tohoku(東北)대학교 정보과학연구과 졸업(공학박사), 1996년 10월~2008년 2월 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원, 현재 인천대학교 공과대학 전기공학과 교수, IEEE 시니어 회원.

Tel : 032-835-8769

E-mail : hmkim@inu.ac.kr

이 병 하 (Byung Ha Lee)

1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 The Pennsylvania State Univ. 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1979년~1994년 한전 기술연구원 선임연구원. 1994년~현재 인천대학교 전기공학과 교수. 2007년~2008년 University of Illinois (Urbana-Champaign) 초빙교수.

Tel : 032-835-8437

E-mail : bhlee@inu.ac.kr