

분산전원의 Fault Ride Through를 고려한 방향성 과전류 계전기 최적 설정법에 관한 연구

A Study on the Optimal Setting Method of Directional Overcurrent Relay Considering Fault Ride Through of Distributed Generation

송진솔* · 조규정* · 김지수* · 신재윤* · 김동현* · 김철환†

(Jin-Sol Song · Gyu-Jung Cho · Ji-Soo Kim · Jea-Yun Shin · Dong-Hyun Kim · Chul-Hwan Kim)

Abstract - Fault Ride Through(FRT) requirement prevents disconnections of distributed generations during the specific time on disturbance condition for system stability. However, since there is a limitation to the FRT capability of distributed generation, and the protection system needs to clear the fault quickly before the distributed generation is disconnected. Therefore, this paper proposes a novel optimal setting method of directional overcurrent relay considering FRT of distributed generation. The proposed method reduces the probability of disconnections of the distributed generation in disturbance without additional equipment considering the FRT capability of the distributed generation by calculating the optimal relay setting through the Genetic Algorithm(GA).

Key Words : Distributed generation, Directional overcurrent relay, Fault ride through, Genetic algorithm

1. 서론

환경문제를 해결하기 위한 일환으로써 점차 많은 분산전원이 배전계통에 연계되고 있다. 분산전원의 연계량이 늘어남에 따라 기존의 단방향 조류 특성의 배전계통은 양방향 조류 특성으로 변모되어질 뿐만 아니라 분산전원의 효율적인 관리를 위하여 점차 방사상 형태에서 점차 망형구조의 계통으로 변화되고 있다. 이러한 변화로 인하여 분산전원이 연계된 계통의 경우 기존의 과전류 계전기가 아닌 방향성 과전류 계전기로 구성된 보호시스템이 각광받고 있다[1]. 계통에 설치된 방향성 과전류 계전기들은 고장 발생 시 설비를 보호하기 위하여 신속하게 최소한의 고장구간을 건전구간으로부터 분리시킬 필요가 있다. 이를 위해서는 각 계전기에는 빠른 동작을 할 수 있을 뿐만 아니라 서로 협조할 수 있게 하는 정정값이 설정되어야 한다. 따라서 방향성 과전류 계전기의 최적 정정값을 계산하는 것은 계통 보호에 있어 중요한 문제이다. 방향성 과전류 계전기의 정정값 계산법은 크게 2가지가 있다. 첫 번째 방법은 결정론적 방법으로 사전에 모든 고장 및 비정상적 동작 상황을 분석하여 계전기 정정값을 계산하는 방법이며 두 번째 방법은 최적화 기법을 통해 정정값을 계산하는 것으로 결정론적 방법에 비하여 간단하기 때문에 비교적 많은 연구

자가 선호한다[2].

일반적으로 계전기 정정값을 계산하는 문제는 Mixed Integer Non-Linear Programming(MINLP)가 되며 복잡한 계산과정이 요구된다. 따라서 다수의 문헌에서는 동작전류(I_{pickup})를 합리적인 값으로 고정시켜 계전기 정정값을 계산하는 문제를 Linear Programming(LP)로 단순화 시킨 다음, Time Dial Setting(TDS)에 대해서만 최적화 계산을 수행하기도 한다[3,4]. 최근 들어서는 유전알고리즘(Genetic Algorithm, GA)이나 진화알고리즘과 같은 지능형 최적화기법을 최적 정정값을 계산하는데 사용하기도 한다[5-7]. 이러한 지능형 최적화기법은 비교적 간단하게 최적값을 계산할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 몇몇 논문에서는 각 최적화 기법의 장점을 고루 갖춘 hybrid형 방법을 제안하기도 하였다[2,8].

분산전원 연계량의 증가로 인하여 외란동안 분산전원의 계통 지원에 대한 중요도 역시 커졌다. 세계 여러 국가들 역시 이를 인지하고 외란동안 분산전원의 연계를 일정시간 이상 유지하며 무효전력을 공급하게 하는 Fault Ride Through Requirement (FRT)를 도입하였다[9]. 몇몇 문헌들 역시 이를 고려하여 외란동안 분산전원의 불필요한 분리를 방지하기 위하여 보다 빠른 계전기 동작을 위한 방안을 제안하였다[4,10]. 참고문헌 [4]의 경우 통신시스템을 이용한 Dual-Setting 특성의 계전기 사용을 제안하였다. Dual-Setting 특성의 계전기는 동작시간을 크게 줄여 분산전원이 분리되는 것을 방지할 수 있지만 통신시스템 구축으로 인한 막대한 투자비용이 요구되어 배전계통에는 부적합한 방법이다. 참고문헌 [10]은 Time-Current-Voltage (TCV) 특성의 계전기를 제안한다. TCV 특성의 계전기는 동작시간을 결정할 때 전

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Korea.
E-mail: hmwkim@hanmail.net

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Korea.

Received : June 14, 2018; Accepted : July 17, 2018

간을 의미하며 Δt_{mb} 가 0보다 크면 두 계전기는 협조 동작하지만, Δt_{mb} 가 0보다 작으면 후비보호계전기가 주보호계전기보다 먼저 동작하거나 동시에 동작하는 협조 위반 상황이 발생할 수 있다.

따라서, 방향성 과전류 계전기의 최적 정정값은 계전기 사이의 협조를 제약조건으로 두고 총 동작시간을 최소화하는 목적함수 식 (3)을 사용하여 계산한다[2].

$$MinOF = a \sum_{i=1}^M t_{m_i} + b \sum_{j=1}^N (\Delta t_{m_{b_j}} - |\Delta t_{m_{b_j}}|) \quad (3)$$

여기서, M 은 계통의 모든 주보호계전기의 수이며, N 은 계통의 모든 협조하는 계전기 쌍의 수이다. 또한 a 와 b 는 각 항에 대한 가중치이다. 추가적으로 식 (4)~(8)에 대한 제약조건까지 고려하여 최적화알고리즘을 통해 가장 적합도가 높은 계전기 정정값을 계산한다. 식 (4)는 계전기 동작전류의 허용범위를 나타낸다. 동작전류는 계전기의 오부동작을 방지하기 위하여 최대부하전류 값보다는 크고 최소고장전류보다는 크게 설정될 필요가 있다. 일반적으로는 최대부하전류의 $k(1.2\sim 2)$ 사이의 정수배의 값을 동작전류로 설정한다.

$$I_{Load_{max}} < I_{pickup} < I_{fault_{min}} \quad (4)$$

식 (5)~(7)은 계전기가 설정할 수 있는 정정값의 범위를 나타낸다. 이 중 식 (6)과 (7)은 사용자 설정 특성을 가지는 디지털 계전기의 특성곡선 상수 설정가능 범위에 해당한다.

$$TDS_{min} < TDS < TDS_{max} \quad (5)$$

$$A_{min} < A < A_{max} \quad (6)$$

$$B_{min} < B < B_{max} \quad (7)$$

식 (8)은 계전기가 물리적으로 동작할 수 있는 최소 동작시간을 나타낸다. 계전기의 정정값은 계전기 동작시간이 최소 동작시간보다는 크도록 설정되어야 한다.

$$t_{min} < t \quad (8)$$

3.3 제안하는 FRT를 고려한 계전기 최적 정정법

분산전원의 외란동안 계통안정도에 미치는 영향이 증가하면서 여러 국가에서는 2장의 FRT 규정을 도입하였다. 하지만 분산전원이 가지는 FRT 능력에도 한계가 있기 때문에 분산전원이 분리되기 전에 고장을 제거하여 분산전원의 PCC 전압을 회복시켜야 한다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 식 (9)에서 나타나는 분산전원의 분리가 허용되는 시간(Δt_{discon})을 최소화하는 새로운 목적함수 식 (10)을 제안한다.

$$\Delta t_{discon} = t_{FRT} - t_{dear} \quad (9)$$

$$MinOF = a \sum_{i=1}^M t_{m_i} + b \sum_{j=1}^N (\Delta t_{m_{b_j}} - |\Delta t_{m_{b_j}}|) + c \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q (\Delta t_{discon_{pq}} + |\Delta t_{discon_{pq}}|) \quad (10)$$

여기서, P 와 Q 는 각각 고려하는 고장 위치의 수와 계통에 연계된 분산전원의 수이다. 각 항에 대한 가중치 a, b, c 는 각 항의 우선순위에 따라 그 크기가 결정되며 b, c, a 순으로 작아지도록 설정하였다. 본 목적함수는 총 계전기 동작시간을 낮추는 것보다는 분산전원의 분리가 허용되는 시간의 총합을 감소시키는 것에 초점을 두고 계전기 정정값의 최적값을 계산한다. 분산전원의 분리가 허용되는 시간의 총합을 감소시킴으로서 계통안정도에 악영향을 미치는 분산전원이 분리될 확률을 낮출 수 있으며 결과적으로 안정도 저하로 인한 2차 피해도 최소화할 수 있다.

3.4 유전알고리즘

본 논문에서는 가장 널리 사용되는 최적화 알고리즘 중 하나인 유전알고리즘을 사용하여 계전기 최적 정정값을 계산한다. 유전알고리즘은 생명체의 진화과정을 모방한 알고리즘으로서 선택, 교차, 변이 연산자로 적합도가 우수한 염색체를 탐색한다. 유전알고리즘을 계전기의 정정값을 구하는 문제에 활용하는 경우에는 염색체를 구성하는 유전자는 계전기의 정정값이 된다(하나의 염색체는 총 계전기수 \times 계전기 정정값의 수에 해당하는 유전자를 가진다). 유전알고리즘 초기에 임의로 설정된 각기 다른 염색체들로 하나의 세대를 생성한다. 새로 초기화된 한 세대의 염색체들을 그림 2(a)의 유전알고리즘을 미리 지정된 세대 수에 도달할 때까지 반복하여 수행, 적합도가 높은 염색체를 탐색한다. 각 염색체의 적합도는 염색체를 구성하는 유전자(계전기의 정정값)

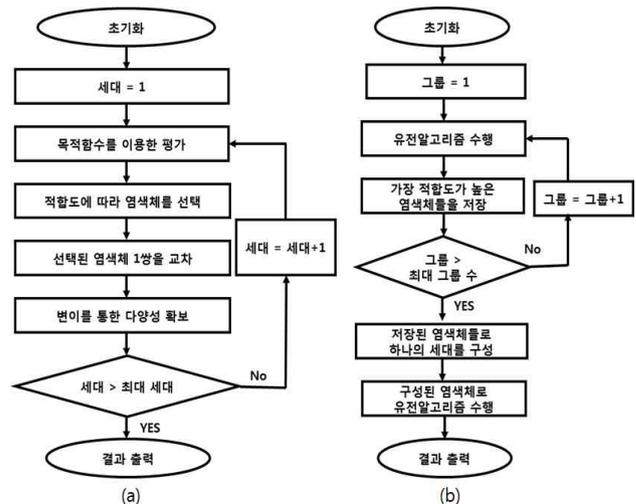


그림 2 (a) 유전알고리즘 흐름도, (b) 유전알고리즘 반복수행 흐름도

Fig. 2 (a) Flowchart of Genetic Algorithm, (b) Flow-chart of Iterative Genetic Algorithm

들에 대하여 제약조건 위반횟수가 적을수록 목적함수 값이 작을수록 커진다. 적합도가 높은 유전자일 경우 많은 세대를 거치더라도 남아있게 되며, 그렇지 못한 유전자의 경우에는 도태되고 변이를 통해 새로운 유전자를 탐색한다.

또한, 본 논문에서는 유전알고리즘의 국부적 수렴 한계를 극복하기 위하여 그림 2(b)와 같이 유전알고리즘의 결과로 나온 우수한 염색체들을 모아 한 번 더 유전알고리즘을 수행한다. 유전알고리즘의 반복수행을 통해 보다 광역적으로 최적화된 결과값을 얻을 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

그림 3은 분산전원이 연계된 IEEE 30 bus test system의 배전계통이다. 계통에는 2MW 용량의 분산전원이 7개의 bus에 연계되어 있으며 총 31개의 방향성 과전류 계전기가 설치되어 있다. 제안하는 방법의 검증은 test system에서 다음의 case들을 비교하여 수행한다.

- Case 1. 기존의 목적함수 - 식 (3)
- Case 2. 제안하는 목적함수 - 식 (10)
- Case 3. 기존의 목적함수 + 디지털계전기
- Case 4. 제안하는 목적함수 + 디지털계전기

Case 1과 2는 각각의 목적함수를 이용하여 31개의 방향성 과전류 계전기의 정정값을 계산한다. 정정값 계산에 필요한 고장전

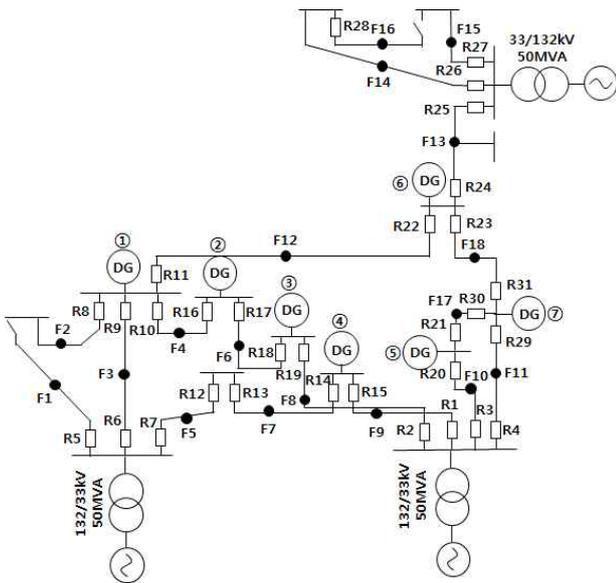


그림 3 변형된 IEEE 30 bus test system의 배전계통 부분
 Fig. 3 Distribution system of modified IEEE 30 bus test system

류 및 고장전압 데이터는 각 선로의 중앙 위치(F1-F18)에 3상 bolted Fault를 모의하여 계산하였다. Case 3과 4는 제한한 목적함수를 사용자 설정 특성의 디지털 계전기에 적용한 것이다. 사용하는 계전기 종류 외에는 Case 1과 2 조건과 동일하다.

각 Case의 비교를 위해서 Case 별로 계산된 정정값이 입력된 IEEE 30 bus test systems의 1년 동안 분리된 분산전원 용량에 대한 확률분포를 Monte Carlo Simulation을 사용하여 계산하였다. 각 선로의 고장률은 국내 배전선로 평균 고장률을 고려하여 0.058 [freq/year]로 가정하였다[12]. 또한 각 분산전원이 계통에서 분리되는 시간에 대한 확률분포는 식 (11)과 같이 균일확률분포로 가정하였다.

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{1.5 - t_{FRT}}, & \text{if } t_{FRT} < t < 1.5 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

4.2 시뮬레이션 결과

표 1과 표 2는 각 Case별 결과를 비교한 것이다. 협조를 위반하는 계전기 쌍을 줄이는 것에 가장 큰 가중치를 두어 모든 Case에서 협조 위반 발생 횟수가 0으로 수렴하였다. 또한 제한한 목적함수를 사용할 경우 계전기 동작시간의 총합은 약간 높아지더라도 분산전원의 분리허용시간의 합은 각각 6.01%, 17.04% 낮추었다. 이는 사용하는 계전기의 종류와는 무관하게 제안하는 목적함수를 사용하면 분산전원 분리허용시간의 합을 저감시킬 수 있다는 것을 나타낸다. 그림 4와 그림 5는 Monte-Carlo Simulation을 통해 구한 고장에 의하여 분리되는 분산전원의 용량에 대한 확률분포를 나타낸다. 각 Case 별로 1년 동안 평균 4.49MW, 4.17MW, 2.34MW, 1.81MW의 분산전원이 분리되어 제

표 1 Case 1과 Case 2의 결과 비교

Table 1 Comparison of Case 1 & Case 2 results

구분	계전기 동작시간 (t_m) 합	협조위반 발생	분산전원 분리허용시간 (t_{FRT}) 합
Case 1	19.5114s	0	37.3987s
Case 2	19.6128s	0	35.1495s
변화량	0.52% ↑	-	6.01% ↓

표 2 Case 3과 Case 4의 결과 비교

Table 2 Comparison of Case 3 & Case 4 results

구분	계전기 동작시간 (t_m) 합	협조위반 발생	분산전원 분리허용시간 (t_{FRT}) 합
Case 3	15.9063s	0	22.2068s
Case 4	15.9439s	0	18.4221s
변화량	0.24% ↑	-	17.04% ↓

안하는 목적함수로 구한 정정값이 설정된 계전기가 더 많은 분산전원이 분리되기 전에 고장을 제거하였음을 확인할 수 있다.

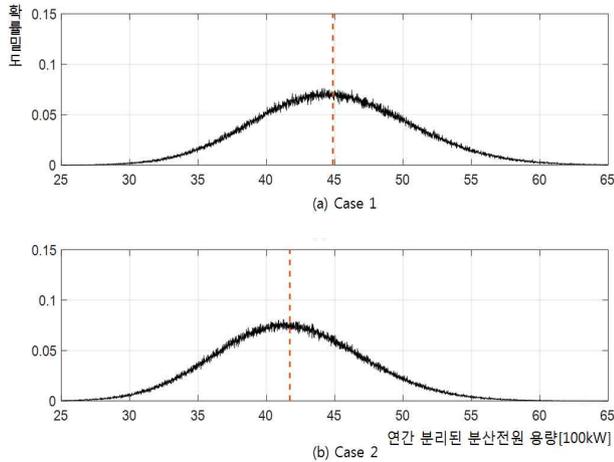


그림 4 분산전원 분리에 대한 확률분포 (Case 1 & Case 2)
Fig. 4 Probability distribution of disconnection of Distributed Generations (Case 1 & Case 2)

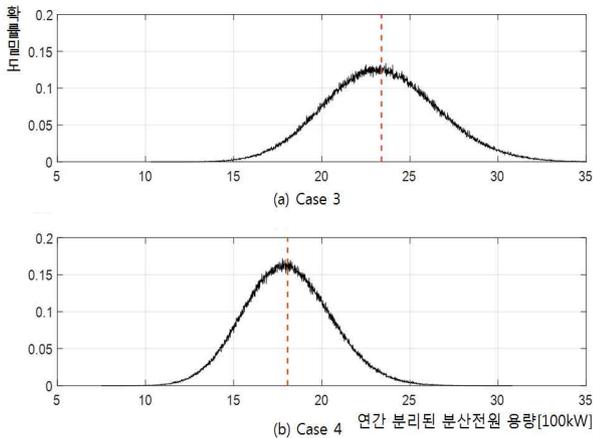


그림 5 분산전원 분리에 대한 확률분포 (Case 3 & Case 4)
Fig. 5 Probability distribution of disconnection of Distributed Generations (Case 3 & Case 4)

5. 결 론

분산전원의 연계량이 증가됨에 따라 외란 도중 분산전원의 계통 지원에 대한 중요도 역시 증가하였다. 많은 국가에서도 이를 인식하고 외란동안 분산전원이 일정시간동안 연계를 유지하며 계통에 무효전력을 공급하는 FRT 규정을 도입하였다. 하지만 분산전원이 계통에 연계를 유지하는 시간에도 한계가 있기 때문에 계통 보호시스템은 분산전원이 계통에서 분리되기 전에 고장을 제거하여 계통전압을 복구할 필요가 있다.

따라서 본 논문은 분산전원의 분리를 최소화하는 과전류계전기 최적 정정법에 관하여 연구하였다. 제안하는 목적함수는 기존의 목적함수에 분산전원의 분리허용시간 합을 최소화하는 항을 새로 추가하여 외란동안 분산전원의 분리 확률을 낮추는 계전기 정정값을 계산한다. 새로운 FRT를 고려한 목적함수는 IEEE 30 bus test system에서 기존의 목적함수와 비교되었으며 Monte Carlo Simulation을 통해 고장에 의하여 분리되는 분산전원의 용량을 낮출 수 있다는 것을 입증하였다. 또한 기존에 연구된 디지털 계전기의 사용자 설정 특성을 고려한 계전기 정정에도 적용하여 기존의 연구와도 쉽게 융합하여 더 큰 성능을 이끌어 낼 수 있음을 입증하였다.

감사의 글

이 성과는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015 R1A2A1A10052459).

References

- [1] Hebatallah Mohamed Sharaf, H.H. Zeineldin, Doaa Khalil, Essam El-Din Abou El-Zanhab, "A proposed coordination strategy for meshed distribution systems with DG considering user-defined characteristics of directional inverse time overcurrent relays", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 65, pp. 49-58, 2015.
- [2] Abbas Saberi Noghabi, Javad Sadeh, Habib Rajabi Mashhadi, "Considering Different Network Topologies in Optimal Overcurrent Relay Coordination Using a Hybrid GA", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 4, pp. 1857-1863, 2009.
- [3] Ekta Purwar, D.N. Vishwakarma, S.P.Singh, "A Novel Constraints Reduction Based Optimal Relay Coordination Method Considering Variable Operational Status of Distribution System with DGs", *IEEE Transactions on Smart Grid(Early Access)*.
- [4] Khaled A. Saleh, Mohamed Shawky El Moursi, Hatem H. Zeineldin, "A New Protection Scheme Considering Fault Ride Through Requirements for Transmission Level Interconnected Wind Parks", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 11, No. 6, pp. 1324-1333, 2015.
- [5] Carlos A. Castillo Salazar, Arturo Conde Enriquez, Satu Elisa Schaeffer, "Directional overcurrent relay coordination considering non-standardized time curves", *Electric Power Systems Research*, Vol. 122, pp. 42-29, 2015.
- [6] D. Solati Alkaran, M.R. Vatani, M.J. Sanjari, G.B.

Gharehpetian, M.S. Naderi, "Optimal Overcurrent Relay Coordination in Interconnected Networks by Using Fuzzy-Based GA Method", *IEEE Transactions on Smart Grid(Early Access)*.

- [7] Farzad Razavi, Hossein Askarian Abyaneh, Majid Al-Dabbagh, Reza Mohammadi, Hossein Torkaman, "A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination", *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, pp. 713-720, 2008.
- [8] Prashant Prabhakar Bedekar, Sudhir Ramkrishna Bhide, "Optimum Coordination of Directional Overcurrent Relays Using the Hybrid GA-NLP Approach", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 1, 2011.
- [9] North American Electric Reliability Corporation (NERC), "Performance of Distributed Energy Resource During and After System Disturbance-Voltage and Frequency Ride-Through Requirements", 2013.
- [10] Korea Electric Power Corporation (KEPCO), "Provision for the use of electrical equipment for transmission and distribution", 2017.
- [11] Bundesverband der Energie-und Wasserwirtschaft e.V. BDEW : "Technical Guideline : Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network", 2008.
- [12] Jung-Hwan Choi, Chang-Ho Park, Woo-Kyu Chae, Sung-Il Jung, Kwang-Ho Kim, Jae-Chul Kim, Jong-Keun Park, "An Improved Investment Priority Decision Method for the Electrical Facilities Considering the Reliability of Distributino Networks", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 54A, No. 4, pp. 177-184, 2008.

저 자 소 개



송진솔 (Jin-Sol Song)

He received a B.S degree from the College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea, in 2017. At present, he is enrolled in the combined master's and doctorate program. His research interests include distributed generation and power system protection.

Tel : (031)290-7166
 Fax : (031)299-4137
 E-mail : wlsthf6@naver.com



조규정 (Gyu-Jung Cho)

He received a B.S and M.S. degree from the College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea, in 2012 and 2014. At present, he is working on his Ph.D. thesis. His research interests include power system transients, protection and power system relaying.
 Tel : (031)290-7166, Fax : (031)299-4137
 E-mail : thug1220@naver.com



김지수 (Ji-Soo Kim)

He received a B.S degree from the College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea, in 2016. At present, he is enrolled in the combined master's and doctorate program. His research interests include power system transients, wind power generation and distributed energy resource.
 Tel : (031)290-7166, Fax : (031)299-4137
 E-mail : kjs7107@naver.com



신재윤 (Jae-Yun Shin)

He received a B.S degree from the College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea, in 2017. At present, he is going through master's course. His research interests include system voltage regulation and distributed energy resource.
 Tel : (031)290-7166, Fax : (031)299-4137
 E-mail : sjy784@naver.com



김동현 (Dong-Hyun Kim)

He received B.S degree in electrical engineering from Korea National University of Transportation, Republic of Korea, in 2017. He is currently working toward the M.S. degree in Energy system from Sungkyunkwan University, Republic of Korea. His research interests include electric power system and lightning protection.
 Tel : (031)290-7166, Fax : (031)299-4137
 E-mail : kdhslass@naver.com



김 철 환(Chul-Hwan Kim)

He received a B.S and M.S. degree from the College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea, in 1982 and 1984, respectively. He received a Ph.D. degree in electrical engineering from Sungkyunkwan University in 1990. In that same year, he joined Jeju National University, Jeju, Republic of Korea as a full-time lecturer. He was a visiting academic at the University of Bath, UK, in 1996, 1998, and 1999. Since March 1992, he has been a professor in the College of Information and Communication, Sungkyunkwan University, Republic of Korea. His research interests include power system protection, the application of artificial intelligence to protection and control, the modeling/protection of underground cables, and EMTP software.

Tel : (031)290-7166, Fax : (031)299-4137

E-mail : hmwkim@hanmail.net