

루프운전 배전선로의 고장계산 방법

A Fault Calculation Method for Loop Structured Distribution Feeders

황 지 희* · 임 성 일*
(Jihui Hwang · Seongil Lim)

Abstract - Loop system arrangement in the primary distribution system has been increased for higher reliability of power supply to the customer. This paper presents a new fault calculation method for the loop structured unbalanced distribution feeders. Mathematical modeling method of the distribution system and superposition principal based fault calculation procedures are provided. In order to establish feasibility of the proposed method, various case studies have been performed using Matlab power system toolbox.

Key Words : Fault calculation, Unbalanced distribution system, Loop system arrangement

1. 서 론

배전선로는 일반적으로 방사상으로 운전되어 왔지만, 최근 스마트그리드 환경에서 공급신뢰도 향상을 위하여 루프운전이 확대되고 있다. 기존의 배전선로 고장계산 방법은 방사상 구조에서 부하의 영향을 무시하는 것으로, 루프운전 배전선로에서 발생한 고장의 계산에는 적용하기 어렵다. 본 논문에서는 서로 다른 변전소간에 루프로 운전되는 배전선로에서 고장이 발생했을 때 선로의 모든 위치에서 전류와 전압을 계산하는 방법을 제시한다.

루프운전 배전선로에서 고장이 발생하면 양쪽 변전소에서 고장선로로 전류가 유입되기 때문에 다중 슬랙 문제가 되어 고장계산이 매우 어렵다. 배전선로의 고장계산 방법에 관한 다양한 연구가 진행되어 왔다. Terzija 등은 아크 저항 공식 기반의 배전선로 고장계산 방법을 제시하였다[1]. 이 논문에서는 반복추정을 통하여 배전선로의 고장전류를 계산한다. Halpin 등은 방사상이 아닌 불평형 3상 배전계통에서의 고장이 발생했을 때 각 노드의 전압, 전류를 계산하는 알고리즘을 제안하였다[2]. Ciric 등은 3상 4선식 배전선로에서 중성선의 접지저항을 고려하여 고장전류 계산 방법을 제시하였다[3]. Wang 등은 다수의 분산전원이 3상 인버터를 통하여 연계된 배전계통에서 단락전류 계산 방법을 제시하였다[4]. Zhang 등은 Hybrid compensation method를 이용한 배전계통 단락회로 분석방법을 제안하였다[5]. 이 논문에서는 방사상과 망상 배전계통에서 새로운 실시간 단락회로 분석에 대한 접근법이 제시되었다.

기존의 배전선로 고장계산 관련 논문에서는 서로 다른 변전소

가 배전선로를 통해 루프로 운전되는 상태에서 발생한 고장에 대하여 선로상의 모든 위치에서 전압, 전류를 계산하는 방법을 발견하기 어렵다. 본 논문에서는 루프운전 배전선로 양단의 변전소들을 독립된 전원으로 보고 중점의 원리를 적용한 고장계산 방법을 제시한다. 고장계산 과정에서 각 변전소의 전압 위상각이 필요한데, 이는 저자 등이 제시한 참고문헌[6]의 방법을 이용하여 구할 수 있다.

본 논문에서는 불평형 배전선로의 모델링 방법과 고장계산 절차를 제시한다. 사례연구에서는 본 논문에서 제시된 방법으로 계산된 결과를 Matlab 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 유용성을 검증하였다.

2. 배전선로 모델링

2.1 고장이 없는 구간의 모델링

고장이 포함되지 않는 배전선로의 한 구간은 그림 1에 나타난 바와 같이 파이 등가회로로 모델링 될 수 있다. 그림 1에서 Z 는 상별 선로 임피던스를 나타내고 Y 는 구간의 부하량을 나타내고 있다. 가공 배전선로는 일반적으로 공장이 매우 짧으므로 전선로의 정전용량에 의한 어드미턴스는 무시된다.

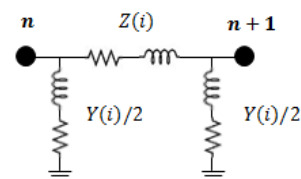


그림 1 배전선로의 파이 등가 모델

Fig. 1 PI equivalent model of the distribution line

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University, Korea.

E-mail: slim@kyungnam.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University, Korea.

Received : March 20, 2016; Accepted : September 28, 2016

상별 선로 임피던스 Z_{abc} 는 한전에서 제공되는 선종별 대칭분 임피던스로부터 식 (1)을 이용하여 변환할 수 있다.

$$Z_{abc} = AZ_{012}A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_0 + 2Z_1 & Z_0 - Z_1 & Z_0 - Z_1 \\ Z_0 - Z_1 & Z_0 + 2Z_1 & Z_0 - Z_1 \\ Z_0 - Z_1 & Z_0 - Z_1 & Z_0 + 2Z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, Z_{012} : 선로의 대칭분 임피던스
 Z_{abc} : 선로의 상 임피던스

구간의 어드미턴스 Y 는 구간부하의 유효전력과 무효전력 $P-jQ$ 를 이용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 구간의 부하량을 알고 있다는 전제하에 고장계산을 수행한다. 실무적으로도 배전자동화 시스템의 보급이 완료됨에 따라 각 FRTU에서 취득된 전압, 전류를 기반으로 구간부하를 쉽게 계산할 수 있다[7].

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{|V|^2}{P-jQ} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{|V|^2}{P-jQ} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{|V|^2}{P-jQ} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

여기서, V : 정격전압
 $P-jQ$: 해당구간의 각 상별 부하전력

2.2 고장이 포함된 구간의 모델링

그림 2는 고장이 발생한 배전선로를 나타내고 있다. 그림 2에서 고장구간 SEC_i 의 공장은 $l[km]$ 이고 고장점 F 는 노드 $n(i)$ 로부터 $r[km]$ 만큼 떨어져 있다.

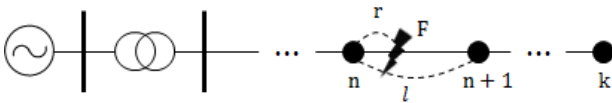


그림 2 고장이 발생한 배전선로
 Fig. 2 Fault occurred on the distribution line

그림 3은 고장구간 SEC_i 의 등가회로를 나타내고 있다. 그림에서 B는 고장저항을 포함한 고장점을 나타내고 있으며, 고장구간 SEC_i 은 고장점을 중심으로 전단(A)과 후단(C)으로 나누어진다. 고장구간 전단과 후단의 구간의 임피던스는 식(3) 식(4)와 같이 계산된다.

$$Z_1(i) = \frac{r}{l} \times Z(i), \quad Z_2(i) = \frac{l-r}{l} \times Z(i) \quad (3)$$

$$Y_1(i) = \frac{r}{l} \times Y(i), \quad Y_2(i) = \frac{l-r}{l} \times Y(i) \quad (4)$$

여기서, $Z(i)$: SEC_i 의 선로 임피던스
 $Z_1(i), Z_2(i)$: 고장구간 전단, 후단 선로 임피던스
 $Y(i)$: SEC_i 의 부하 어드미턴스
 $Y_1(i), Y_2(i)$: 고장구간 전단, 후단 부하 어드미턴스

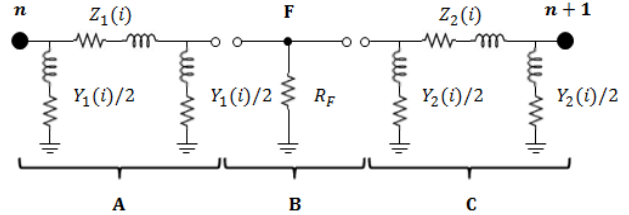


그림 3 고장구간의 파이 등가 모델
 Fig. 3 PI equivalent model of faulted section

3. 고장계산 절차

3.1 중첩의 원리 적용

그림4는 루프운전 배전선로에서 적용한 고장계산 절차를 나타내고 있다. 중첩의 원리를 적용하여 각 변전소를 독립된 전원으로 보고 각 전원에 대한 회로를 해석하여 그 결과를 중첩하였다.

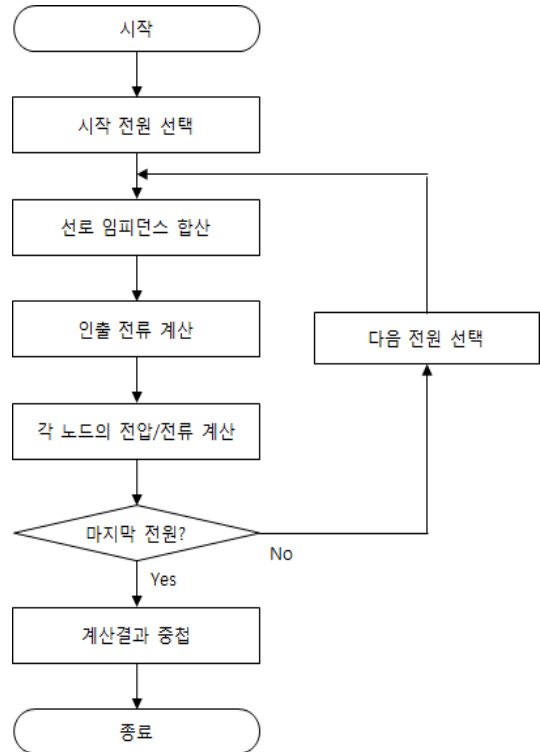


그림 4 고장계산 순서도
 Fig. 4 Flow chart of fault calculation procedure

3.2 선로 임피던스 합산 및 인출전류 계산

하나의 변전소가 선택되면 전술한 모델링 방법을 이용하여 고장회로를 구성한다. 고장회로는 선로 임피던스, 부하 어드미턴스 및 고장 임피던스가 직병렬로 연결된 사다리꼴 회로가 된다. 물론 선택된 변전소 이외의 다른 변전소는 단락된 것으로 처리된다. 그림 5는 고장회로의 예를 나타내고 있다.

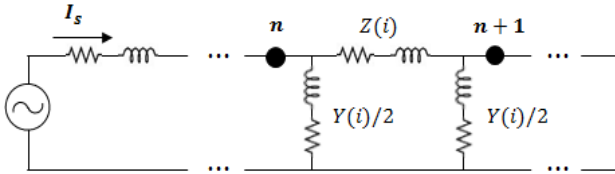


그림 5 사다리꼴 회로의 임피던스 합계

Fig. 5 Impedance accumulation of ladder circuit

변전소에서 선로로 인출되는 전류 I_s 를 계산하기 위해서는 회로 전체의 임피던스 합계를 구하여야 한다. 사다리꼴 회로의 임피던스는 말단으로부터 전원 측으로 향하면서 쉽게 합계를 계산할 수 있다. 그림 5에서 노드 $n+1$ 부하측 임피던스의 합계를 Z_{n+1} 이라 할 때 노드 n 의 임피던스는 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$Z_n = (Y(i)/2 + (Z(i) + (Y(i)/2 + (Z_{n+1})^{-1})^{-1})^{-1})^{-1} \quad (5)$$

여기서, Z_n : 노드 n 까지의 임피던스 합계

3.3 각 노드의 전압, 전류 계산

변전소 인출단의 전압, 전류를 알면 4단자 정수를 이용하여 모든 노드에서 전압, 전류를 계산할 수 있다. 그림 6은 고장선로의 임의의 구간에 대한 파이 등가회로를 나타내고 있다.

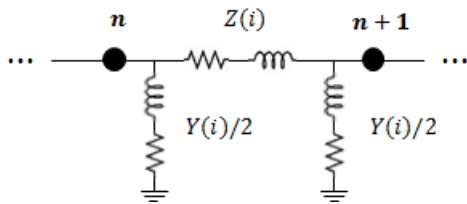


그림 6 4단자 정수를 이용한 전압 전류 계산

Fig. 6 Voltage and current calculation using ABCD constant

그림 6에서 노드 $n+1$ 의 전압과 전류는 노드 n 의 전압과 전류로부터 식(6)과 같이 4단자 정수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, V_n : 노드 n 의 전압

I_n : 노드 n 의 전류

선로의 한 구간을 π 등가회로로 모델링 하였으므로 4단자 정수는 식 (7)과 같이 된다. 식 (7)을 식 (6)에 대입하여 모든 구간에 적용하면 고장선로 모든 노드에서의 전압과 전류를 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z(i)Y(i)}{2} & Z(i) \\ Y(i)(1 + \frac{Z(i)Y(i)}{4}) & 1 + \frac{Z(i)Y(i)}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

그림 7은 고장점 컨덕턴스와 고장점에서의 전압, 전류를 나타내고 있다.

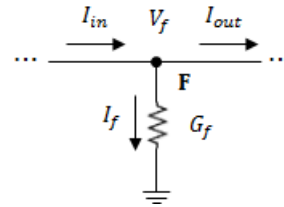


그림 7 고장점에서 전류 흐름

Fig. 7 Current flow at the fault location

고장점 F 에서 하단으로 흐르는 전류 I_{out} 는 상단에서 유입되는 전류 I_{in} 으로부터 고장 컨덕턴스를 통해 대지로 흐르는 전류 I_f 의 차이므로 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$I_{out} = I_{in} - I_f = I_{in} - G_f \cdot V_f \quad (8)$$

여기서, I_f : 고장 전류

G_f : 고장 컨덕턴스

V_f : 고장점 전압

4. 사례 연구

본 논문에서 제안된 루프유전 배전선로 고장계산 방법의 유용성을 검증하기 위하여 Matlab Simulink Power System Toolbox

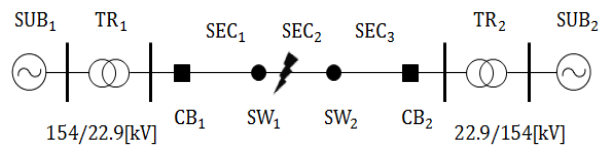


그림 8 사례연구를 위한 예제 배전계통

Fig. 8 Example distribution line for case study

시뮬레이션을 이용한 사례연구를 수행하였다. 그림 8은 변전소 2개, 주변압기 2대, 배전선로 2개, 개폐기 4개로 구성된 예제 배전계통을 나타내고 있다. 구간 SEC2에서 고장이 발생한 사례로서 고장점은 개폐기 SW₁으로부터 2[km] 떨어진 지점이다.

표 1은 변전소의 1차측 모선에서 바라본 전원측 등가임피던스를 나타내고 있고, 양단 변전소의 위상각은 20[°] 차이로 상정하였다. 표 2는 주변압기 임피던스를 나타내며 변압기 Tr₁과 Tr₂의 탭은 각각 1.1과 1.2이다.

표 1 변전소 임피던스

Table 1 Substation impedance

변전소 임피던스		R[Ω]	X[Ω]
SUB ₁	정상분	5.6207	43.2106
	영상분	26.6094	122.9437
SUB ₂	정상분	9.7236	64.5075
	영상분	46.7205	161.0316

표 2 변압기 임피던스

Table 2 Transformer impedance

주변압기		X[Ω]
TR ₁	1차측	37.7348
	2차측	0.8344
TR ₂	1차측	47.4320
	2차측	1.0488

전력선과 중성선의 선종은 각각 ACSR 160[mm²]과 ACSR 95[mm²]이다. 표 3은 사례연구에 사용된 ACSR 160[mm²] 배전선의 단위길이 당 임피던스를 나타내고 있다.

표 3 배전선로 임피던스

Table 3 Distribution line impedance

구분	R[Ω/km]	X[Ω/km]
정상분	0.2024	0.3891
영상분	0.5176	1.1894

표 4 각 구간별 부하와 공장 데이터

Table 4 Loading and line length of sections

구간	상	P[kW]	Q[kvar]	공장[km]
SEC ₁	A	1170	566.66	8
	B	1140	374.70	
	C	1001	456.07	
SEC ₂	A	1302	514.58	10
	B	1034	375.29	
	C	1440	697.42	
SEC ₃	A	1288	548.69	7
	B	1843	461.90	
	C	1023	404.32	

표 5 고장 발생 시 각 노드의 전압

Table 5 Node voltages during the fault

개폐기		크기[PU]			위상[°]		
		Matlab 모의	제안된 방법	오차 [PU]	Matlab 모의	제안된 방법	오차 [PU]
CB ₁	A	0.71920	0.71918	0.00003	-6.43126	-6.43131	0.00001
	B	1.12841	1.12839	0.00002	59.86408	59.86425	0.00000
	C	1.11695	1.11693	0.00002	-53.77108	-53.77090	0.00000
SW ₁	A	0.14431	0.1443	0.00007	-6.25018	-6.25000	0.00003
	B	1.27024	1.27021	0.00002	54.19227	54.19260	0.00001
	C	1.28533	1.2853	0.00002	-42.42308	-42.42280	0.00001
SW ₂	A	0.41357	0.41356	0.00002	11.69282	11.69283	0.00000
	B	1.22998	1.22995	0.00002	61.73471	61.73496	0.00000
	C	1.27236	1.27233	0.00002	-42.07584	-42.07561	0.00001
CB ₂	A	0.77479	0.77477	0.00003	11.56201	11.56207	0.00001
	B	1.19918	1.19915	0.00003	70.42896	70.42914	0.00000
	C	1.22400	1.22397	0.00002	-43.59897	-43.59887	0.00000

표 4는 각 구간의 공장과 상별 부하량을 나타내고 있다. 부하 불평형 조건에서 고장계산의 정확성을 보이기 위하여 예제 배전

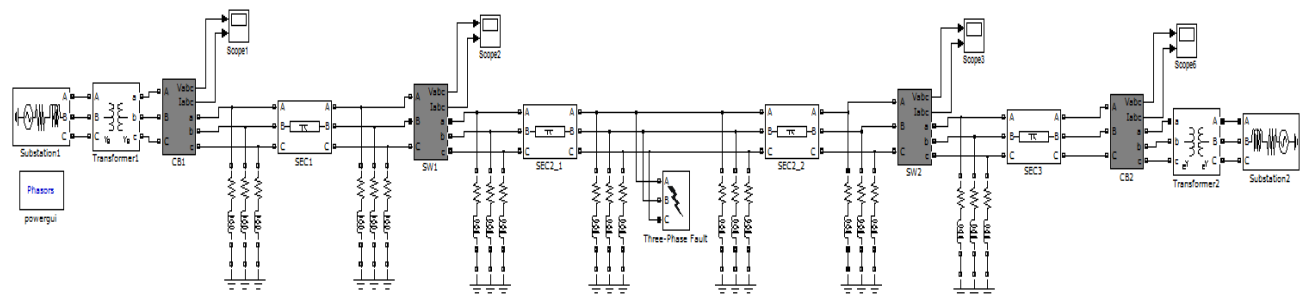


그림 9 테스트 배전계통의 Matlab Simulink 모델

Fig. 9 Matlab Simulink representation of the test distribution system

표 6 고장 발생 시 각 노드의 전류

Table 6 Node current during the fault

개폐기		크기[PU]			위상[°]		
		Matlab 모의	제안된 방법	오차 [PU]	Matlab 모의	제안된 방법	오차 [PU]
CB ₁	A	5.28347	5.28343	0.00001	-75.01561	-75.01594	0.00000
	B	0.93875	0.93878	0.00003	81.80792	81.80645	0.00002
	C	0.89718	0.89723	0.00006	-41.21733	-41.21743	0.00000
SW ₁	A	5.24241	5.24237	0.00001	-75.43219	-75.43252	0.00000
	B	1.04825	1.04829	0.00004	76.42758	76.42643	0.00002
	C	1.01218	1.01222	0.00004	-45.05055	-45.05047	0.00000
SW ₂	A	3.93964	3.93963	0.00000	-46.94439	-46.94454	0.00000
	B	1.15903	1.15900	0.00003	71.99282	71.99296	0.00000
	C	1.20854	1.20852	0.00002	-48.73280	-48.73309	0.00001
CB ₂	A	4.00767	4.00766	0.00000	-46.25415	-46.25431	0.00000
	B	1.37746	1.37743	0.00002	68.71187	68.71196	0.00000
	C	1.34125	1.34122	0.00002	-50.31556	-50.31581	0.00000

계통 각 구간의 상별 부하량과 역률을 다양하게 설정하였다.

표 5와 6은 Matlab을 이용한 시뮬레이션과 본 논문에서 제시된 방법으로 계산된 결과를 비교하여 나타내고 있다. 예제 배전선로에 고장이 발생했을 때 각 개폐기 설치점에서의 전압과 전류의 크기와 위상에 대한 오차를 계산하였다. PU법을 적용하기 위한 기준전력, 1차측 기준전압, 2차측 기준전압은 각각 10[MVA], 154[kV], 22.9[kV]이다. 표에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제시된 방법으로 계산된 전압과 전류가 Matlab 시뮬레이션 결과가 무시할 수 있는 오차 이내로 동일하다. 따라서 본 논문에서 제시하는 루프운전 배전선로의 고장계산 방법이 유용하다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 루프운전 배전선로의 고장계산 방법을 제시하였다. 고장선로를 파이 등가회로로 모델링하고 중점의 원리를 적용하여 계산하였으며 사례연구에서 Matlab 시뮬레이션과의 오차 비교를 통하여 유용성을 검증하였다.

본 논문에서 제안한 방법은 고장전류 뿐만 아니라, 고장이 발생했을 때 선로상의 모든 노드에서 전압과 전류를 계산할 수 있다. 제안된 고장계산 방법은 DMS용 배전계통 시뮬레이터 개발을 위하여 고안되었으나, 향후 다양한 운전상황에서 효율적인 배전계통 운영을 위하여 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20154030200770)

References

- [1] V. V. Terzija, R. Ciric and H. Nouri, "Improved Fault Analysis Method Based on a New Arc Resistance Formula", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 1, pp. 120-126, Jan. 2011
- [2] S. M. Halpin and L. L. Grigsby, "Fault analysis of multi-phase unbalanced nonradial power distribution systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 3, pp. 528-534, May/June. 1995
- [3] R. M. Ciric, L. F. Ochoa, A. Padilla-Feltrin and H. Nouri, "Fault analysis in four-wire distribution networks", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 6, pp. 977-982, Nov. 2005.
- [4] Q. Wang, N. Zhou and L. Ye, "Fault Analysis for Distribution Networks With Current-Controlled Three-Phase Inverter-Interfaced Distributed Generators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 3, pp. 1532-1542, June. 2015
- [5] X. Zhang, F. Soudi, D. Shirmohammadi and C. S. Cheng, "A distribution short circuit analysis approach using hybrid compensation method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 2053-2059, Nov. 1995
- [6] J. Son and S. Lim, "Substation Bus Voltage Angle Calculation Method Using Voltage Angle Difference Measured at the Tie Switch in the Distribution Line", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol 65, No. 1, pp. 9-15, Jan. 2016
- [7] J. Park, C. Jeon and S. Lim, "Accurate Section Loading Estimation Method Based on Voltage Measurement Error Compensation in Distribution System", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol 30, No. 2, pp. 43-48, Feb. 2016

저 자 소 개



황 지 희 (Jihui Hwang)

1995년 2월생. 2016년 경남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 첨단공학과 석사과정.
Tel : 055-249-2630
E-mail : hwangjh899@gmail.com



임 성 일 (Seongil Lim)

1967년 7월 10일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 석사과정 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경남대학교 전기공학과 교수
Tel : 055-249-2630
E-mail : slim@kyungnam.ac.kr