

동적 부하를 고려한 전력계통의 On-Line 안정도 해석

서규석^{1*}, 박지호², 권기진³

¹거제대학교 선박전기와, ²경북대학교 전기공학과, ³영남이공대학 의로기기와

Power System Stability Analysis Considering Dynamic Loads

Gyu-Seok Seo^{1*}, Ji-Ho Park² and Ki-Jin Kwon³

¹Dept. of Electrical Engineering, Koje College

²Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University

³Dept. of Biomedical Engineering, Yeungnam College of Science & Technology

요 약 본 논문에서는 동적 부하를 고려한 전력계통의 과도 안정도 해석을 모의하고자 한다. 모터는 계통 부하의 주요부분을 차지하고 있으며 이들의 동적 부하 특성은 전력계통의 안정도 해석에 있어서 매우 중요한 요소이다. 전력계통의 안정도해석에서 개별 부하의 특성을 모두 반영할 수 없기 때문에 일반적으로 모터 부하를 일정 임피던스 부하로 취급하고 있다. 본 논문에서는 이러한 일반적인 방법으로 해결할 수 없는 개별부하의 특성을 고려해야만 하는 산업용 전력계통의 경우 모터의 동적 특성을 고려하여 안정도 해석을 수행하여 안정도 해석에 있어서 모터의 영향을 보였다. 대상은 실 계통인 광양제철소의 전력계통이며 3상고장에 의한 모터부하의 영향을 분석한다.

Abstract In this paper, we have simulated the transient stability of power system with dynamic loads. Dynamic load characteristics have an important influence on power system stability. In study of power system stability, motors form a major portion of the system loads. Induction motors and synchronous motors in particular form the workhorse of the electric power industry. Therefore modelling of motors is important in system stability. We investigate the effect of motors loads of Kwang Yang network with three phase fault.

Key Words : Power System Analysis, Transient Stability, Dynamic Load

1. 서론

전력계통을 안정적으로 운전하기 위해서는 시스템 부하의 크기에 상응하는 발전량을 발전소에서 발전을 해야 한다. 따라서 전력계통의 안정도 해석에 있어서 부하의 특징은 중요한 영향을 미친다.

부하를 정적인 모델로 취급하는 경우 전압과 주파수의 변화에 대한 응답은 빠르고 응답의 정상상태 도달속도는 매우 빠르다. 그러나 많은 경우 부하의 동적인 특성을 고려해야 되는데 방전램프의 소호나 재점등, 보호계전기의 동작, 부하의 온도조절장치제어, ULTC의 동작, 전동기부하가 집중되어 있는 경우가 그 예들이다. 대부분의 전력

계통의 시뮬레이션에 있어서 이들의 영향을 상세히 반영하지는 못하고 부하에 등가모델로서 삽입하는 정도이다.

부하에서 소비되는 전 에너지의 60%-70%를 전동기에 소비하므로 전동기에 기인하는 동적인 특성이 시스템 부하의 동적인 특성의 가장 중요한 측면이다[1].

일반적으로 전력계통의 안정도해석에서는 전동기 부하를 일정 임피던스 부하로 취급하고 있다. 이는 전력계통이 복잡한 시스템이고 개별 부하의 특성을 모두 반영할 수 없기 때문인데, 전동기가 부하의 큰 부분을 차지하는 배전 계통의 경우 전동기의 영향을 정확하게 고려하지 않으면 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 없다. 따라서 본 논문에서 배전계통에서 전동기의 동적특성을 고려하

*Corresponding Author : Gyu-Seok Seo

Tel: +82-55-680-1558 email: gsseo@koje.ac.kr

접수일 12년 07월 03일

수정일 12년 08월 14일

게재확정일 12년 09월 06일

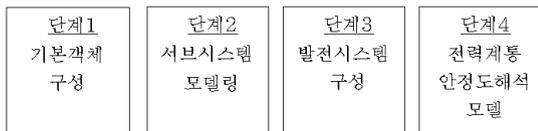
여 안정도해석을 하였다.

실제 전력계통의 운전사항을 데이터베이스를 연계하여 저장하고 이 데이터베이스를 기초로 계통을 안정도를 모의하게 된다. 제철소와 같은 배전계통은 한전계통과 연계가 되어있지만 대규모의 전력을 소비하는 시스템으로 자체 발전기의 발전용량도 크고, 부하의 대부분이 용량이 큰 전동기부하이다. 따라서 발전기와 전동기의 상호 영향이 제철소 계통의 안정운전에 관건이라 할 수 있다. 본 논문에서는 광양제철소의 발전기, 전동기 그리고 한전계통과 연계하여 온라인으로 안정도를 모의한다.

2. 본론

2.1 시스템 모델링

동적인 시스템은 미분방정식으로 모델링하며 이를 수치적인 방법으로 해를 구하면 동적인 시스템의 응답을 구하는 것이다. 시스템이 복잡해질수록 이를 나타내는 미분방정식도 복잡하고 또한 그 해를 구하는 것이 어렵다. 본 논문에서는 동적시스템을 모델링하는 미분 방정식을 시스템의 변화에 보다 유연하게 대응하기 위해 미리 만들어진 기본소자들을 상호 연결하는 객체지향프로그래밍(OOP) 기법을 채택한다. 이들 기본 객체들을 시스템의 모델에 맞게 이진트리로서 연결을 하면 시스템이 모델링된다[2]. 예로서 $\dot{x} = x + y + xy$ 의 미분방정식으로 모델링 되는 시스템이 있다면, 본 논문에서 사용하는 객체지향적 모델링 방법은 다음과 같다. 우선 주어진 식에서 방정식을 살펴보면 두 번의 덧셈과 한 번의 곱셈이 필요하고 이들의 결과를 적분해서 미분방정식을 해를 구한다. 따라서 덧셈을 하는 객체, 곱셈을 하는 객체 그리고 적분을 하는 객체를 컴퓨터 프로그램 상에서 구현하고 이를 이진 트리를 연결하면 시스템의 모델링이 완성되는 것이다. 즉 아날로그 컴퓨터 방식을 디지털 컴퓨터에서 구현하는 것이다.



[그림 1] 전력계통 안정도해석의 객체지향적 모델링
 [Fig. 1] Object Oriented Modelling for Power System Stability Analysis

그림 1은 발전기 안정도 해석을 위한 객체지향적 모델링 단계[2-3]를 나타낸 것이다. 객체지향적 모델링은 대

상시스템의 가장 기본적인 모듈을 프로그램에서 객체화하여 이들을 상호 연결하여 시스템을 모델링하는 방식이다. 이 방법은 시스템의 변화에 유연하기 때문에 복잡한 시스템의 해석에 유리하다.

전력계통의 안정도 해석 모델은 발전시스템과 선로를 상호 연결함으로써 완성된다. 발전기는 여자시스템을 포함하여 모델링된다. 선로는 어드미턴스 행렬로 표현되며 전동기를 제외한 부하는 일정임피던스 부하로 취급하여 해석을 행한다. 본 논문에서 사용한 동기발전기 모델은 식(1)-(8)의 이축모델이다.

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0}}(E_{FD} - E) \quad (1)$$

$$\dot{E}'_d = \frac{1}{1 + sT_{q0}}(x_q - x'_q) \quad (2)$$

$$E = E'_q + (x'_d - x_d)I_d \quad (3)$$

$$T_e = E'_d I_d + E'_q I_q - (x'_q - x_q)I_d I_q \quad (4)$$

$$V_d = -rI_d - x'_q I_q + E'_d \quad (5)$$

$$V_q = -rI_q + x'_d I_d + E'_q \quad (6)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M}(T_M - D\omega - T_e) \quad (7)$$

$$\delta = \omega - 1 \quad (8)$$

여기서, E'_q 는 횡축 과도 유기 기전력, E_{FD} 는 여자전압, E 는 고정자 공극 실효치 전압, V_d 는 단자전압의 직축 성분, V_q 는 단자전압의 횡축 성분, I_d 는 단자전류의 직축 성분, I_q 는 단자전류의 횡축 성분, x_d 는 직축 리액턴스, x_q 는 횡축 리액턴스, x'_d 는 직축 과도 리액턴스, x'_q 는 횡축 과도 리액턴스, T_e 는 전기적 토크, T_{d0} '는 직축 과도 개방회로 시상수이다.

2.2 부하의 모델링

정적인 부하모델은 모선의 전압의 크기에 의존하는 지수함수형 모델을 사용한다.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^a \quad (9)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^b \quad (10)$$

여기서 P는 유효전력, Q는 무효전력, V는 모선전압 그리고 P_0, Q_0, V_0 는 초기 동작점의 유효전력, 무효전력, 모선전압을 나타낸다. 멱지수 a 및 b는 0일 때 일정전력, 1일 때 일정전류, 2일 때 일정임피던스 부하를 나타낸다.

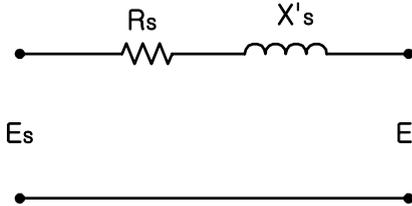
전력계통의 안정도 해석에서는 일반적으로 부하를 일정임 피턴스로 나타낸다.

동기전동기의 모델은 토크식을 제외하고는 동기발전기와 같은 방법으로 모델링된다. 동기발전기와 동기전동기는 직축과 횡축의 과도현상을 고려한 이축모델로 모델링한다.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - T_m) \quad (11)$$

여기서 T_e 는 전기적토크, T_m 은 기계적토크, H 는 전동기와 부하의 관성정수이다.

유도전동기의 과도상태 등가회로는 그림 2와 같다.



[그림 2] 유도전동기 과도등가회로
[Fig. 2] The induction motor's equivalent circuit for transient state.

그림 2에 대한 전기방정식은

$$\begin{aligned} \frac{dE_d'}{dt} &= -\frac{1}{T} (E_d' + (X_s - X_s') i_{qs}) + \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} E_q' \\ \frac{dE_q'}{dt} &= -\frac{1}{T} (E_q' - (X_s - X_s') i_{ds}) - \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} E_d' \\ T_e &= E_d' i_{ds} + E_q' i_{qs} \\ \tilde{E}_s &= (R_s + jX_s') \tilde{I}_s + \tilde{E}' \\ \tilde{I}_s &= i_{ds} + jI_{qs} \end{aligned} \quad (12)$$

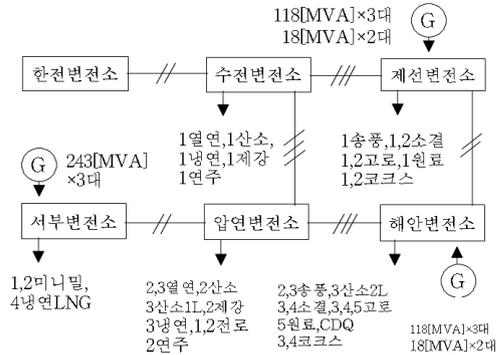
여기서 T 는 과도개방회로시상수, X_s 는 동기리액턴스, X_s' 는 과도동기리액턴스, E_d' 는 직축과도유기전압, E_q' 는 횡축과도유기전압, ω_s 는 동기각속도, ω_r 은 회전자 각속도, I_{ds} 는 고정자전류의 직축성분, I_{qs} 는 고정자전류의 횡축성분이다.

2.3 부하의 모델링

광양제철소의 전력계통[4-5]은 그림 3과 같이 한전으로부터 154[kV] 송전라인과 사용전압 154[kV], 22[kV], 6.6[kV]의 배전선로로 구성되어 수전, 제선, 압연, 해안,

서부의 5개의 변전설비와 118[MVA]급 8기, 18[MVA]급 6기의 발전설비와 변압설비들로 구성되어 있다.

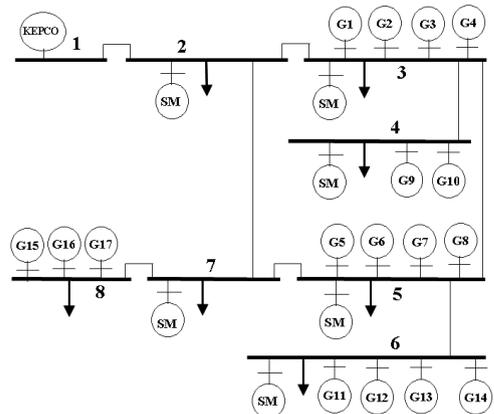
그림 4는 안정도 해석을 위한 간략화된 단선도이다. 실제 시뮬레이션에 사용된 단선도는 123모선이나 여기서는 8모선으로 간략히 표현되어 있다. 모선 중 1, 2, 3, 5, 7, 8번 모선은 154[kV]이고, 4, 6모선은 22[kV] 모선이다. 1번은 한전모선으로 무한모선으로 표현한 것이고, G1~G8은 118MVA급의 발전기이며 G9~G14는 18MVA급의 발전기이다.



[그림 3] 광양제철소 전력계통 구성도
[Fig. 3] Kwang-Yang Network Diagram

그리고 G15~G17는 LNG 발전기이다. 발전기의 모델링은 여자시스템을 포함하고 있다. 각 모선에는 동기전동기부하와 일반부하가 있고, 그림에서 변압기는 생략하였다. 동기전동기는 각 모선에 다수가 존재하나 그림에서는 대표적으로 하나의 전동기로 나타냈다.

부하는 각 모선에 바로 연결된 것이 아니고, 변압기와 22[kV], 6.6[kV]의 모선을 거쳐 부하가 분산되어 있다.

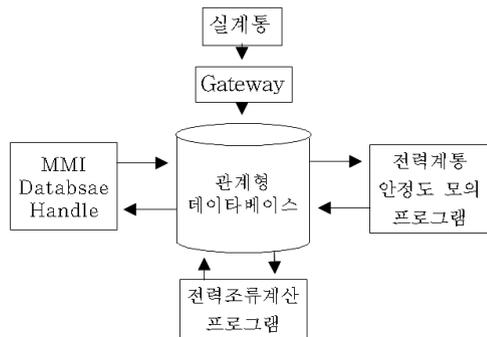


[그림 4] 안정도 해석을 위한 간략화된 계통도
[Fig. 4] Simplified Network Diagram for Power System Stability Analysis

계통은 전체적으로 볼 때 방사상식으로 보이나 실제로는 4번 모선과 2번 모선의 22[kV]의 부하모선 사이, 6번 모선과 7번 모선의 22[kV]의 부하모선 사이 그리고 7번 모선과 8번 모선의 22[kV]의 부하모선 사이에 연결선로가 있으나 통상 개방상태로 운전된다.

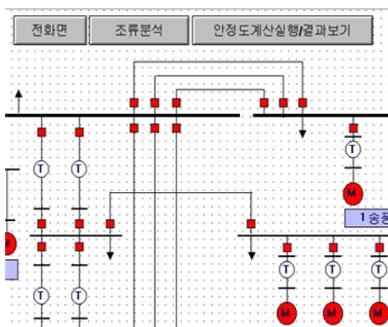
2.4 온라인 안정도 해석

실계통에 대한 온라인 안정도 해석을 위한 전체적인 구성은 그림 5와 같다. 실계통의 실측 데이터를 데이터베이스에 저장하고, MMI 화면에서는 실계통도를 GUI를 이용하여 실측 데이터를 표시한다. 전력조류계산 프로그램은 MMI 화면에 표시된 현재의 시스템 부하에 대한 조류계산 및 설정된 상정사고에 대한 조류계산을 행한다. 안정도 모의 프로그램은 현재의 가정된 사고에 대한 안정도해석을 현재의 전력조류를 초기치로 가지고 행한다. 관계형 데이터베이스는 이들 프로그램들에서 사용되는 모든 자료와 데이터를 저장하고 관리한다.



[그림 5] 온라인 안정도해석 개념도
[Fig. 5] Concept of On-Line Power System Stability Analysis

사용자에 대한 인터페이스(MMI)는 Intouch를 이용한다.

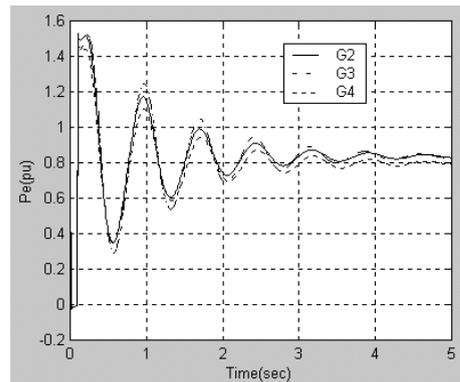


[그림 6] 사용자 인터페이스 화면의 일부분
[Fig. 6] User Interface

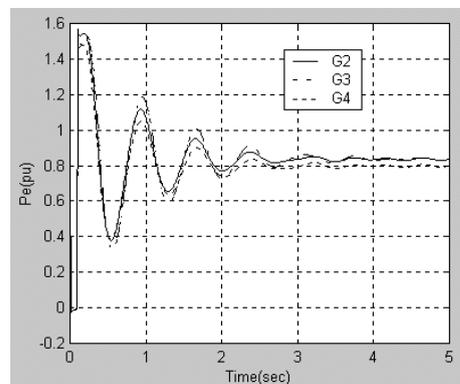
Intouch의 특징은 화면상의 객체가 데이터베이스를 통하여 연결되도록 되어있어 데이터베이스를 통한 응용프로그램과의 연결이 가능하다. 인터페이스 화면에는 광양 제철소의 실계통이 표시된다. 사용자 인터페이스 화면의 일부분을 그림 6에 나타냈다.

2.5 안정도 모의

안정도 모의조건은 제철소의 임의의 운전상태에서 인터페이스화면의 임의의 선로를 클릭함으로써 안정도 모의조건을 입력하고 그 선로에 3상 단락사고를 가정한다. 이러한 일련의 동작이 Intouch 화면 내에서 이루어진다. 본 논문에서는 발전기 G1과 3번 모선사이의 3상 단락사고를 가정하고 시뮬레이션 한 경우를 예로 든다. 발전기는 LNG발전기를 제외한 14대의 동기발전기를 고려했고, 전동기는 동기전동기로서 일정임피던스로 고려한 경우와 동적응답을 고려한 경우를 비교한다. 동기전동기의 동적 특성의 모델링의 대부분은 동기 발전기와 같고 동요방정식은 식 11과 같다.



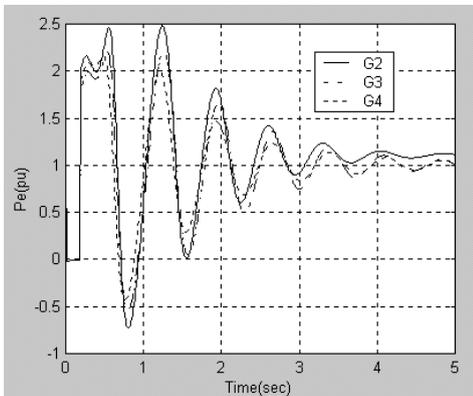
[그림 7] 모터를 일정임피던스로 취급한 경우(Case1)
[Fig. 7] In case of Constant Impedance Load(Case1)



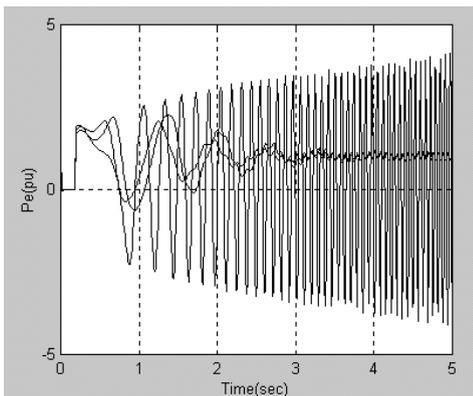
[그림 8] 모터의 동적응답을 고려한 경우(Case1)
[Fig. 8] In case of Dynamic Load(Case1)

그림 7은 전동기를 일정임피던스 부하로 취급한 경우의 사고 모션에 인접한 발전기 2, 3, 4번의 유효전력의 변화를 나타낸 것이다. 사고 직전 G2의 출력은 $P_e=0.836$ [pu], G3는 $P_e=0.837$ [pu], G4는 $P_e=0.798$ [pu]이다. 고장 제거시간은 0.1s 로 가정했다. 계통의 모든 초기치는 광양제철소 전력계통 특정 시점의 실제 운전 데이터이다. 그림 7과 8을 비교해 보면 전동기의 동적응답을 고려한 경우 응답의 진폭이 작음을 알 수 있다.

전동기는 관성을 가지는 부하이므로 응답속도가 늦음을 알 수 있다. 고려한 전동기는 22대의 동기전동기이고 용량은 8.41~48.65[MVA] 이다. 전동기에 걸린 부하는 일정한 것으로 가정했다. 사고 후 발전기 G1이 계통에서 분리되더라도 나머지 발전기들이 동기화를 유지함을 알 수 있다.



[그림 9] 모터를 일정임피던스로 취급한 경우(Case2)
[Fig. 9] In case of Constant Impedance Load(Case2)



[그림 10] 모터의 동적응답을 고려한 경우(Case2)
[Fig. 10] In case of Dynamic Load(Case2)

같은 고장점에 대하여 고장제거시간을 0.188s로 했을 때 응답이 그림 9와 10이다. 전동기의 동적특성을 고려하

면 불안정함을 알 수 있다. 사고제거 시간을 크게 잡았을 때 전동기부하의 동적특성이 안정도에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 전동기를 고려하는 방법에 따라 안정도의 한계가 달라짐의 확인할 수 있다.

본 논문의 안정도 모의에서는 선로의 제약이나, 한전 모선의 용량제약을 설정하지는 않았다. 하지만 전동기의 동적특성이 안정도에 많은 영향을 미침을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 광양제철소내의 전력계통에 대하여 온라인 안정도 해석을 수행하였다. 안정도 해석에 있어서 일반적으로 일정임피던스 부하로 취급되는 전동기를 동적인 모델로 취급하여 사고 시 전동기의 동적응답을 반영하였다. 광양제철소의 경우 부하의 상당부분을 동기 전동기가 차지하는데 시뮬레이션결과 전동기의 동적응답을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우 해석 결과가 차이가 남을 알 수 있었다. 즉 전동기부하가 집중된 시스템의 경우 전동기의 동적 특성을 정확히 고려하는 것이 시스템의 정확한 해석에 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 또한 사용자 인터페이스를 통한 온라인 안정도 해석 시스템을 구축하였다. 안정도 해석 엔진과 인터페이스를 별개로 구축하였고 데이터베이스를 통한 데이터의 관리로 프로그램의 유지를 보다 쉽게 할 수 있도록 하였다. 이것은 같은 시스템에 대한 다른 해석 엔진과의 연계를 쉽게 할 수 있다는 장점을 가진다. 실제통을 대상으로 온라인 안정도 해석을 하였는데 또한 의의를 둘 수 있다.

References

- [1] Ji-Ho Park, Young-Sik Baek, Jae-Yong Lee and Jung-Hun Shin, "Digital Computer Simulator Using Object-Oriented Method", Trans. KIEE vol. 45, no. 10, pp. 1387-1393, Oct 1996.
- [2] Ji-Ho Park and Young-Sik Baek, "The Power System Stability Analysis Method Using Object-Oriented Programming" The International Conference on Electrical Engineering(ICEE '98), Kyungju, Korea, Vol. 2. pp. 285-288, July, 1998.
- [3] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [4] SIEMENS, "Power Transmission and Distribution Power System Planning", FINAL REPORT PART1:REPORT, 1996.

[5] SIEMENS, "Power Transmission and Distribution Power System Planning", FINAL REPORT PART3:DATA DOCUMENTATION, 1996.

서 규 석(Gyu-Seok Seo)

[정회원]



- 2003년 2월 : 경북대학교 전기공학과 (공학사)
- 2005년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2009년 2월 ~ 현재 : 거제대학교 선박전기과 교수

<관심분야>

배전시스템 운영 및 제어, 스마트 그리드

박 지 호(Ji-Ho Park)

[정회원]



- 1991년 2월 : 경북대학교 전기공학과 (공학사)
- 1996년 8월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2012년 2월 ~ 현재 : 경북대학교 강사

<관심분야>

전력계통 안정도, 스마트 그리드

권 기 진(Ki-Jin Kwon)

[정회원]



- 1991년 2월 : 경북대학교 전기공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 경북대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 경북대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1999년 9월 ~ 2009년 7월 : 영진전문대학 조교수
- 2009년 8월 ~ 현재 : 영남이공대학교 의료기과 조교수

<관심분야>

의공학, 센서시스템, 반도체공정 및 Bio-MEMS