



터빈-발전기 축 비틀림 현상 연구동향

손승현 · 정세진 · 김철환<성균관대학교 전자전기공학부>

1 서론

최근 화석 연료의 고갈로 인해 에너지 문제에 대한 심각성이 대두되고 있다. 이로 인해 화석 연료를 대체할 에너지원인 태양광, 풍력 등의 신재생 에너지에 대한 관심이 증가하고 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 신재생 에너지원을 통해 기존의 전력계통에 공급되는 에너지의 양이 점차 증가하고 있는 추세이다. 하지만 이러한 신재생 에너지원들로부터 얻는 에너지로는 최근 매년 증가하는 에너지 소비를 충족하기에 그 양이 부족한 실정이다. 그러므로 여전히 전력생산의 많은 부분을 기존의 화력 발전과 원자력 발전에 의존하고 있다.

19세기 말부터 주 에너지 공급원으로써 지금까지 널리 사용되어온 화력 발전과 1950년대에 실용화되어 주로 기저 발전으로써 사용된 원자력 발전이 오늘날 요구되는 에너지의 대부분을 공급하고 있다. 그림 1과 표 1에 나타낸 2012년도에 한국전력에서 발표한 발전량 추이에 관한 통계에 따르면 현재 에너지 공급 측면에서 화력 발전과 원자력 발전이 차지하고 있는 비중을 확인할 수 있다[1].

이러한 현 상황에서 매년 에너지 소비는 급격히 증가하고 있어 점차 전력공급에 어려움을 겪고 있다. 특히 우리나라에서는 지난 2011년 9월 15일에 대규모 순환 정전이 발생하였다. 이 사건을 통해 한정된 발전

량에 따른 효율적인 에너지 사용의 필요성, 예비력 확보의 중요성 등이 대두되었다. 사실상 늘어나는 전력 소비량을 충족하기 위하여 발전소를 신설하는 것은 현실적으로 어렵다. 발전소 신설에 요구되는 비용 문제뿐 아니라 환경문제로 인한 전 세계적인 저탄소 녹색성장이 주요한 이슈가 되고 있고 이 외에도 우리나라는 국토가 좁아 발전소 부지 확보에도 어려움이 있다. 따라서 원활한 에너지 공급을 위해서는 효율적인 에너지 소비를 위한 수요관리가 수행되어야 하고 기

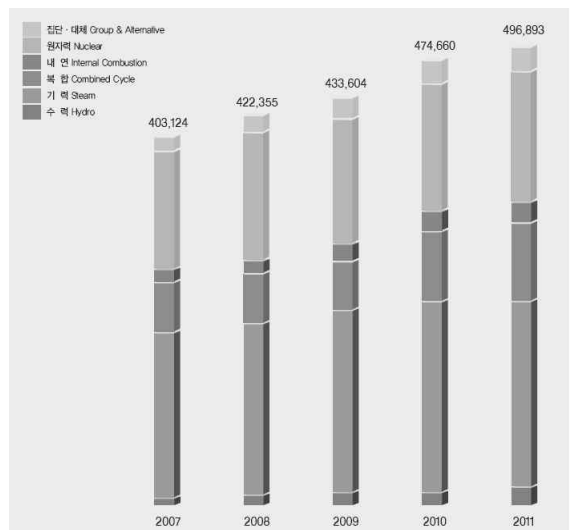


그림 1. 2007년~2011년도 발전량 추이 그래프
(출처 : 2012년도 한국전력통계 제81호)

표 1. 2007년~2011년도 발전량 추이 데이터
(출처 : 2012년도 한국전력통계 제81호)

단위 : GWh

구분	2007	2008	2009	2010	2011
수력	5,042	5,563	5,641	6,472	7,831
기력	174,246	184,384	207,391	211,449	211,205
복합	76,405	74,519	64,486	94,506	101,479
내연력	578	503	697	731	820
원자력	142,937	150,958	147,771	148,596	154,723
집단/대체	3,916	6,428	7,618	12,906	20,835

존에 운영되어온 발전시설들의 유지보수 및 관리가 이루어져야 한다.

특히 에너지 생산의 대부분을 차지하는 화력 발전과 원자력 발전에서 사용되는 스팀 터빈 발전기에 대한 지속적인 관리가 필요하다. 해외에서는 이러한 터빈 발전기와 전력계통의 상호작용으로 발생하는 터빈-발전기 축 시스템의 기계적 손상에 관한 다수의 연구들이 수행되어 왔다. 미국에서는 1970년대 네바다 지역에서 발생한 터빈 발전기 축 균열 및 소손 사고 이후 터빈 발전기 축 비틀림 상호작용에 대한 연구가 활발하게 수행되었다.

우리나라에서도 지난 2013년 8월에 터빈 발전기 저압터빈 블레이드 절손으로 인해 당진화력 3호기의 가동이 중단되는 사고가 발생하였다. 이로 인해 예비력 감소 등 안정적인 전력수급에 차질이 발생하였고 수요관리 시행이 요구되기도 하였다. 따라서 화력 발전과 원자력 발전에 의존하고 있는 우리나라의 실정에 미루어 볼 때 이와 같은 터빈 발전기 축과 블레이드 손상에 관한 심도 있는 연구가 요망된다.

우리나라에서는 해외와는 달리 터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 상호작용에 관련된 분야에 대한 관심과 인식이 미미한 실정이다. 뿐만 아니라 대학에서 해당 분야에 관한 연구를 수행하기 위해 필수적인 터빈 발전기의 기계적 데이터를 취득하는데도 어려움이 있

어 원활한 연구 진행이 현실적으로 힘든 실정이다. 따라서 국내에서도 터빈 발전기의 유지보수 및 관리에 대하여 더 많은 관심을 가지고 터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 응답에 관한 이론적인 연구가 체계적으로 수행될 수 있는 환경이 조성될 필요가 있다.

2. 해외 터빈 발전기 축 시스템 손상 사례[2]

해외에서는 터빈 발전기 축 시스템의 손상을 경험한 사례들이 다수 존재한다. 특히 차동기 공진에 의한 축 시스템 손상 사례는 미국 네바다 주 서부 지역에 있는 Mohave 발전소에서 1970년, 1971년에 걸친 두 번의 사고를 통해 알려지게 되었다. 이후 IEEE는 차동기 공진에 대한 연구 과제를 수행하고 이와 관련된 그룹을 결성하였다. 또한 차동기 공진 현상에 관한 기술 보고서를 발간하고 벤치 마크 모델을 제시하는 등 활발한 연구 활동이 진행되었다. 이 밖에도 아르헨티나, 브라질, 캐나다, 이탈리아, 일본 등 세계 여러 국가에서 터빈 발전기 축 시스템 손상에 관한 사고 사례들이 보고되고 연구가 진행되었다. 표 2는 EPRI의 보고서에 언급된 터빈 발전기 축 시스템 손상에 관한 대표적인 몇 가지 사례들을 나타낸 것이다.

3. 터빈 발전기 축 시스템

터빈 발전기 축 시스템은 기계적인 구성요소들로 구성되어 있다. 이러한 기계적인 구성요소들은 고압 터빈(HP), 중압터빈(IP), 저압터빈(LP) 및 발전기 회전자로 이루어진 다중 질량체 모델로 등가화 시킬 수 있다. 그림 2는 이러한 터빈 발전기 축 시스템의 다중 질량체 모델을 보여준다. 다중 질량체 모델은 일정한 직경을 가지는 회전체가 스프링을 통해 연결된 시스템을 의미한다. 이 때 질량체의 갯수는 터빈 발전기 설계에 따라 달라질 수 있고 각각의 질량체들은 고유의 관성 모멘트(J)를 가진다. 또한 각각의 질량체

표 2. 해외의 터빈 발전기 축 시스템 사고 사례(출처 : 2006년도 EPRI Report)

사고 발생 발전소	발전기 정격	사고 발생 구성요소	사고 내용
Mohave Unit 2 (Southern California Edison)	483MVA (3600RPM)	발전기 콜렉터 축 손상	차동기 공진으로 인한 발전기 축 고장 발생
Prairie Island Unit 1 (Nuclear Management Co.)	530MW (1800RPM)	저압터빈 블레이드 손상	120Hz 부근의 비틀림 공진으로 인한 저압터빈 블레이드(L-1, L-2) 고장 발생
Maanshan (Taiwan Power)	1057MVA (1800RPM)	터빈 블레이드, alternator 축 손상	120Hz 부근의 비틀림 공진으로 인한 저압터빈 블레이드 균열 발생 및 저압터빈 블레이드 균열로 인한 발전기 축 균열 발생
Montecello Unit 1 (Nuclear Management Co.)	570MW (1800RPM)	축 피로 수명 소비	HVDC 인버터 변전소에서의 700MW 전력 동요로 인한 축 피로 수명 손실 발생 및 발전기 재조정 수행
Comanche Unit 2 (XCEL Energy)	350MW (3600RPM)	발전기 축 크랙 발생	120Hz에 근접한 비틀림 주파수 발생, 축 수리 및 새 커플링 설치, 발전기 축 크랙 발생
Susquehanna Unit 1 (Pennsylvania Power and Light)	1050MW (1800RPM)	저압터빈 블레이드 손상	120Hz 인근의 비틀림 공진으로 인한 저압터빈 블레이드(L-1) 고장 발생, 비틀림 모드 조정을 위한 관성링 설치
South Texas Project Unit 2 (South Texas Project Nuclear Operating Co.)	1300MW (1800RPM)	저압터빈 블레이드 손상	다수의 저압터빈 블레이드 크랙 발생, 발전기 Unit 1의 저압 터빈 블레이드에서도 크랙 발생
Dresden Unit 2&3 (Exelon)	912MW (1800RPM)	발전기 축 크랙 발생	간헐적인 진동 토크로 인한 발전기 축 크랙 발생

를 연결하는 스프링들 역시 스프링 상수(K)를 갖고 터빈 발전기마다 운전 시 서로 다른 감쇄계수(D)를 가진다. 하지만 터빈 발전기의 비틀림 응답을 분석할 때에는 이러한 감쇄계수에 의한 영향을 무시하고 분석을 수행하는 것이 일반적이다.

4. 터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 응답 [3-4]

터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 응답이 발생하는 원리는 뉴턴의 운동방정식으로 다음과 같이 설명될 수 있다. 터빈에 입력되는 스팀 입력 토크 (T_m)에 의해 터빈 발전기 축 시스템이 동기 속도로 회전하고 발전기 공극에 전기적 토크(T_e)가 유도된다. 따라서 발

생하는 60Hz의 전력은 고정자 권선을 통해 계통으로 공급된다. 이 때 전력계통과 터빈 발전기 축 시스템 사이에서 전자기적 결합이 형성된다. 전력계통이 정상상태로 운전될 때에는 운동방정식의 우변의 스팀 입력 토크와 전기적 토크가 일정한 값으로 유지되고 좌변의 각변위 또한 일정한 값을 갖기 때문에 터빈 발전기의 축 시스템과 전력계통 사이에는 일정한 전자기적 결합이 유지된다. 하지만 전력계통에 외란이 발생하게 되면 발전기 고정자 권선에 급격한 전류 변화가 발생하여 전기적 토크가 진동하게 된다. 이로 인해 스팀 입력 토크와 전기적 토크 간에 균형이 깨지고 그 결과 터빈 발전기 축 시스템과 전력계통 간에 일정하게 유지되던 전자기적 결합이 상실되어 공진 형태의 터빈 발전기 축 시스템 비틀림 응답이 발생하게 된다.

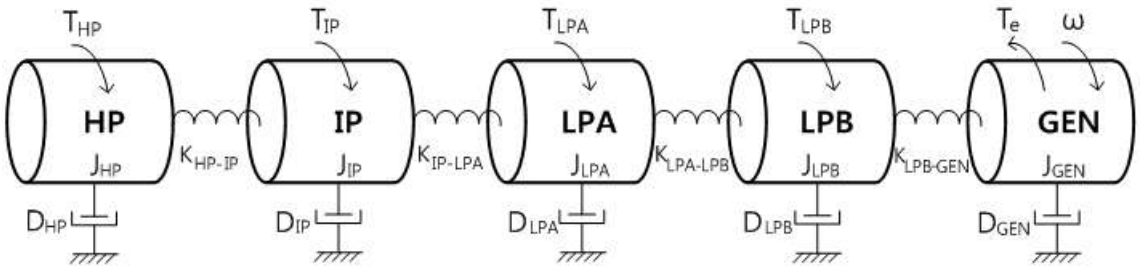


그림 2. 터빈 발전기 축 시스템 다중 질량체 모델

그림 3은 전력계통과 터빈 발전기 사이의 비틀림 상호작용을 보여주며 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + K\theta = T_m - T_e \quad (1)$$

- 여기서, J : 관성 모멘트의 5×5 대각행렬
- D : 감쇠계수의 5×5 대각행렬
- K : 스프링 상수의 5×5 비대각행렬
- θ : 각 질량체의 5×1 각변위 행렬
- $T_m - T_e$: 각 질량체의 입,출력 토크의 5×1 행렬

이러한 터빈 발전기 축 시스템의 비틀림 응답을 야기하는 원인들은 다음과 같다.

① 시스템 상의 개폐 현상

전력계통 내에서 터빈 발전기 축 시스템에 비틀림 응답을 야기할 수 있는 일반적인 현상들은 다음과 같다. 1) 송전선로, 발전기, 변압기 등을 개폐하는 차단기 동작, 2) 전력계통 내의 과도현상 및 고장 제거를 위한 개폐 동작, 3) 송전선로의 고속도 자동 재폐로(HSR), 4) 터빈 발전기의 동기탈조, 5) 아크, 입자가속기와 같은 주기적으로 발생하는 맥동 부하, 6) 직렬 커패시터 삽입 또는 개폐, 7) 부하 탈락 등으로 인해 야기되는 비틀림 상호작용 등으로 터빈 발전기

축에 비틀림 현상이 발생한다. 이러한 개폐 (switching) 동작들은 터빈 발전기 축 시스템에 스트레스를 누적시켜 수명을 감소시킨다. 비틀림 진동이 터빈 발전기 축에 지속적으로 작용하면 터빈 발전기 축에서 가장 큰 스트레스를 받는 지점의 표면에서부터 균열이 발생하게 되고 결과적으로 터빈 발전기 축 크랙(파손)을 유발하게 된다[5-6].

② 차동기 공진

(Subsynchronous resonance)

차동기 공진(SSR)은 전력계통과 터빈 발전기 간의 상호작용으로 특정한 운전조건 하에서 터빈 발전기 축의 진동이 증폭되는 현상을 말한다. 여기서 특정한 운전조건이란 전력계통에서 외란, 또는 개폐 동작으로 인해 터빈 발전기가 접속된 전원계통이 상용 주파수보다 작은 값의 공진 주파수 성분을 포함하게 되는 상태를 말한다. 상용 주파수보다 작은 값의 공진 주파수는 터빈 발전기 축의 고유 주파수에 근접하기 때문에 전력계통이 이러한 공진 주파수를 포함하게 되면 터빈 발전기 축의 고유 주파수와 공진하여 큰 비틀림 상호작용이 발생하게 된다. 이러한 과정을 통해 궁극적으로 차동기 공진은 터빈 발전기 축에 진동을 야기하고 손상을 발생시키게 된다.

차동기 공진이 발생할 수 있는 조건으로는 직렬 보상 선로가 대표적이다. 장거리 송전선로의 송전 능력

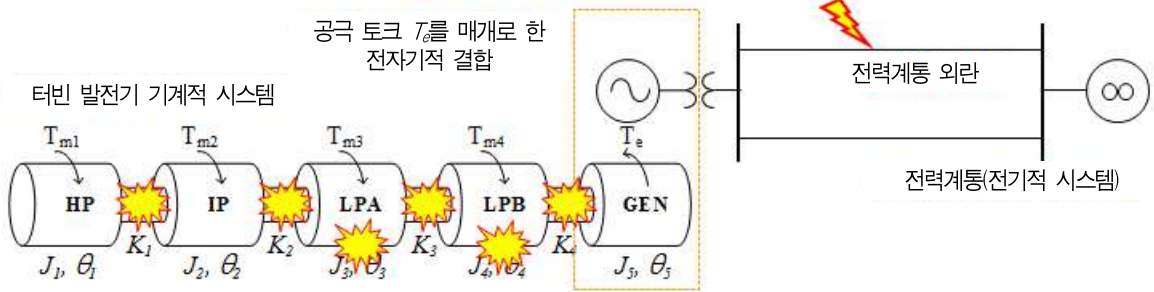


그림 3. 전력계통과 터빈 발전기의 비틀림 상호작용

을 증가시키기 위한 목적으로 직렬 커패시터 보상이 사용되지만 이러한 직렬 보상은 차동기 공진을 유발하는 원인이 된다.

송전선로에 직렬 커패시터 보상 수행 시 전력계통에 존재하게 되는 공진 주파수의 값은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$f_n = f_0 \times \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2)$$

- 여기서, f_n : 공진 주파수
- f_0 : 공칭 주파수
- X_C : 용량성 리액턴스
- X_L : 유도성 리액턴스

직렬 보상으로 선로의 용량성 리액턴스(X_C)가 변하게 되고 일반적으로 선로의 유도성 리액턴스(X_L)가 용량성 리액턴스보다 더 크기 때문에 공칭 주파수(f_0)보다 작은 값을 가지는 공진 주파수 (f_n)가 계통에 포함된다. 이 공진 주파수 (f_n)의 값과 유사한 값을 가지는 터빈 발전기 고유 주파수가 존재하면 공진이 발생하여 터빈 발전기 축에 진동을 증폭시키는 비틀림 상호작용이 발생하게 된다.

이러한 차동기 공진 현상은 앞서 소개한 1970년대 미국 네바다 주의 Mohave 발전소에서 처음 관찰되었으며 이후 미국에서는 차동기 공진에 관해 활발한

연구가 진행되었다.

③ 기기 의존형 차동기 진동

(Device Dependent Subsynchronous Oscillations, DDSO)

기기 의존형 차동기 진동 현상은 전력계통 내 전력 기기의 제어특성에 의해 야기되는 터빈 발전기 축의 진동 현상을 가리키며 이는 차동기 공진 (Subsynchronous resonance)과는 구분된다. 해당하는 기기의 범주로는 전력계통 안정화장치 (Power System Stabilizer, PSS), 고압직류 컨버터 (HVDC Converters) 등이 있다. 기기 의존형 차동기 진동은 터빈 발전기가 HVDC 선로와 인접하여 연결될 때 주로 발생한다. HVDC 선로와 근거리에서 연결된 발전기에서 축 진동이 발생하면 발전기 단자 전압 및 전류의 변화가 발생하고 그로 인해 HVDC 접속 모선의 전압 및 전류가 변화한다. 이에 반응하여 HVDC 컨버터와 같은 제어기기들이 동작함으로써 다시 발전기 단자 축 전압과 전류의 상태를 변화시키고 이는 최종적으로 터빈 발전기 축의 진동을 증폭시키게 된다.

앞서 언급한 일반적인 시스템 상의 개폐 동작들 및 차동기 공진으로 인한 비틀림 상호작용에 관한 연구는 1970년대 이후로 미국 등의 해외에서 많은 연구가 진행된 반면, 기기 의존형 차동기 진동에 관한 연

구는 상대적으로 관심이 적었다. 하지만 최근 HVDC(고압직류송전), LVDC(저압직류배전) 등 직류 근간 기술에 이목이 집중되고 있고 점차 발전하여 기존의 교류 계통과 연계되는 경우가 늘어나고 있다. HVDC 컨버터 및 이와 관련된 제어기기들의 활용도가 높아지는 추세에 따라 이러한 기기 의존형 차동기 진동이 터빈 발전기 축 시스템에 미치는 영향에 관한 연구가 진행될 필요가 있다. 따라서 앞으로 국내에서 터빈 발전기 축 시스템에 관한 연구의 방향으로써 기기 의존형 차동기 진동에 관해 연구를 진행한다면 직류 근간의 기술이 각광받고 있는 현 추세와 맞물려 연구적으로 높은 시너지 효과를 발휘할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 국내의 터빈-발전기 축 비틀림 연구동향

국내에서는 터빈 발전기 축 시스템에 관한 연구가 해외만큼 활발하게 진행되지 못했다. 앞서 언급한 바와 같이 미국에서는 1970년대부터 터빈 발전기 축 시스템에 관련된 사고 사례를 통해 해당 분야에 대한 다양한 활동이 시작된 반면 국내에서는 1990년대까지도 수행된 연구활동이 미진하였다. 이때까지는 간헐적으로 연구 논문이 발표된 정도였고 2000년대 초반 이후로 학계의 관심이 높아져 매년 10~20편 이상의 논문들이 지속적으로 발표되기 시작했다. 2010년도 이후로는 연구 활동이 더욱 활발해져 매년 30여 편에 가까운 논문들이 발표되고 있다. 하지만 이 중에서 기계 및 진동 분야에서 발표된 논문들을 제외하면 전력계통과 터빈 발전기 간의 상호작용에 관한 연구 활동은 상당히 부족한 상황이다. 또한 그 동안 송전선로 재폐로와 같은 연구과제에서 수행된 터빈 발전기 축 시스템에 관한 연구는 축에 발생하는 비틀림 토크를 살펴보는 하나의 측정요소 정도로만 활용되어 왔기 때문에 터빈 발전기 축 시스템에 관한 보다 근본적이고 심도있는 연구가 요구된다.

6. 결 론

전 세계적으로 환경 및 안전에 관한 관심과 경각심이 높아짐에 따라 화력 발전과 원자력 발전에 대한 부정적인 시선들이 증가하고 있다. 하지만 하루가 다르게 급증하고 있는 에너지 소비로 인해 안정적인 전력 공급에 어려움을 겪고 있는 현 상황에서 대부분의 전력공급을 담당하고 있는 화력, 원자력 발전은 필수불가결하다. 신재생 에너지를 활용한 발전 기술이 발달하여 점차 화력, 원자력 발전에 대한 의존도를 줄여나가는 동안 기존 발전소들에 대한 철저한 유지보수 및 관리를 통해 안정적인 전력공급을 지속할 필요가 있다. 이러한 관점에서 우리는 화력, 원자력 발전에서 널리 사용되는 터빈 발전기에 대하여 관심을 가질 필요가 있다. 특히 최근 관심이 고조되고 있는 HVDC와 관련된 기기 의존형 차동기 진동 현상 등과 관련하여 전력계통과 터빈 발전기 간의 상호작용에 취약한 터빈 발전기 축 시스템에 관한 심도 있는 연구가 요망된다.

본고에서 언급한 바와 같이 해외의 경우에는 다양한 터빈 발전기 축 시스템의 사고 사례들을 경험하였고 그와 관련된 연구들이 활발히 이루어진 반면 우리나라에서는 여전히 해당 분야에 관한 연구가 미미한 실정이다. 국내에서도 해당 분야에 대한 많은 관심과 활발한 연구가 수행되길 기대한다.

참고문헌

- [1] 한국전력공사, “한국전력통계 제81호(2011년)”, 2012.
- [2] 田村, “Steam Turbine-Generator Torsional Vibration Interaction with the Electrical Network”, June 2006.
- [3] Praba Kundur, “Power System Stability And Control”, McGraw-Hill, 1994.
- [4] P.M. Anderson, “Power System Protection”, John Wiley&Sons, 1998.
- [5] C.E.J. Bowler, P.G. Brown, D.N. Walker, “Evaluation of the Effect of Power Circuit Breaker Reclosing Practices on Turbine-Generator Shafts”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 5, 1980.
- [6] J.S. Joyce, T. Kulig, D. Lambrecht, “The Impact of

High-Speed Reclosure of Single and Multi-phase System Faults on Turbine-Generator Shaft Torsional Fatigue”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 1, 1980.

◇ 저 자 소 개 ◇



손승현(孫承賢)

1986년 11월 4일생. 2012년 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과 졸업. 2014년 성균관대학교 정보통신대학 졸업(석사). 2014년~현재 성균관대학교 정보통신대학 박사과정.

Tel : (031)299-4630
Fax : (031)299-4137
E-mail : sons86@skku.edu



정세진(鄭世眞)

1990년 12월 17일생. 2013년 가천대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 성균관대학교 정보통신대학 석·박사 통합과정.

Tel : (031)299-4630
Fax : (031)299-4137
E-mail : 12sj17@gmail.com



김철환(金喆煥)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 성균관대학교 정보통신대학 교수. 전력 IT인력양성센터 센터장.

Tel : (031)290-7124
Fax : (031)299-4137
E-mail : hmwkim@hanmail.net