

7차 전력수급계획에 따른 송전계통 손실 분석에 관한 연구

Assessment of Transmission Losses with The 7th Basic Plan of Long-term Electricity Supply and Demand

김 성 열[†] · 이 여 진^{*}
(Sung-Yul Kim · Yeo-Jin Lee)

Abstract - In recent years, decentralized power have been increasing due to environmental problems, liberalization of electricity markets and technological developments. These changes have led to the evolution of power generation, transmission, and distribution into discrete sectors and the division of integrated power systems. Therefore, studies are underway to efficiently supply power and reduce losses to each sector's demand. This is a major concern for system planners and operators, as it accounts for a relatively high proportion of total power, with a transmission and distribution loss of 4-6%. Therefore, this paper analyzes the status of loss management based on the current transmission and distribution loss rate of each country and transmission loss management cases of each national power company, and proposes a loss rate prediction algorithm according to the long-term transmission system plan. The proposed algorithm predicts the demand-based long-term evolution and the loss rate of the grid to which the transmission plan is applied.

Key Words : Distributed generation, Load duration, Power trading Contracts, Power transmission loss

1. 서 론

최근 몇 년간 환경문제, 전기 시장의 자유화 및 기술발전으로 인해 배전시스템에 분산전원이 증가하고 있으며 이러한 변화로 발전, 송전, 배전이 개별분야로 진화되며 통합된 전력시스템의 분할이 나타나고 있다. 모든 분야에서 공급과 소비의 동시성으로 인해 전력의 효율적 공급 및 손실저감을 위해 노력 중이며 전체 계통의 송배전 손실은 계통을 통해 전달되는 총 전력의 4~6%를 차지하고 있어 계통 계획자와 운영자에게 중요관심사였다. 특히 에너지 시장의 경쟁환경에서 시스템 손실 비용이 해당 시스템 운영자에게 할당되는 방식인 Transmission Loss Allocation(TLA)은 오랜 기간 많은 방법들이 연구되었다[1]. TLA 방법은 부하지속곡선을 이용하여 확률적으로 송전손실계수 산정[2], 조류 흐름을 추적하여 손실 산정[3], Jacobian을 활용한 손실 계수산정[4], Z-버스를 이용한 손실 할당 법[5], GGDF (Generalized Generation Distribution Factor) 및 GLDF (Generalized Load Distribution Factor)을 기반으로 한 버스 체계 손실 할당 법 등과 같은 다양한 방법들이 연구되었다[6].

분산전원은 부하 또는 배전시스템에 직접 연결되어 전력을 생산, 공급하는 발전원으로 정의되며 역방향 전력흐름, 전압상승, 안정성 문제, 손실 감소와 같은 여러 이점을 가져온다. 분산전원의 증가로 인해 최근 배전시스템 또한 전력

손실을 최소화하기 위한 분산전원 최적 배치에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 배전시스템의 손실 요인 중 변압기의 손실을 분산전원의 공급으로 인한 감축방법, 변압기 탭 전압 변경, 인공 신경망 접근법을 통한 변압기 손실평가, 변압기 권선 손실 분석 모델 연구, 배전 변압기 손실 감소방법 등 다양한 배전시스템 손실에 대한 연구가 진행되었다.

송전시스템의 경우, 앞서 말한 전력계통의 변화로 인한 HVDC, 고압 케이블 지중화 등이 추진되고 있으며 이로 인해 손실이 변화 하고 TLA방법이 더욱 연구되고 진행될 것이다. 또한 송전시스템의 경우 전력계통의 변화에 대해 설비의 장기적인 건설계획이 필요하다.

본 논문은 먼저 국가별 송배전손실을 현황을 분석한 후, 각 국가별 대표 전력회사들의 송전시스템의 손실관리 사례를 분석하고 송전시스템의 발전 및 송전설비의 추가, 확충, 폐기와 같은 계통계획을 기반으로 예측된 전력수요에서 발생 가능한 손실 예측 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 대한민국의 송전시스템에 적용하여 2015년 7월 공고된 "제 7차 전력수급기본계획"의 장기적인 송전시스템계획을 기반으로 현재부터 계획기간의 마지막 연도인 2029년까지의 송전시스템 손실률을 예측한다.

2. 국가별 송전손실 현황

국가별 송배전손실 현황에 대한 사례조사는 아시아, 아메리카, 유럽의 3 대륙으로 분류하여 진행하였다. 각 대륙 별 4개의 국가를 선정하여 송배전 손실률 및 각 국가의 대표 전력회사의 손실관리 사례를 분석한다. 그림 1은 1인당GDP, 인구밀도를 손실률로 비교 분석한 것이다. 그림에서 나라별 원의 크기는 2013년의 손실률을 나타낸다.

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Energy Engineering, Keimyung University, Korea
E-mail : energy@kmu.ac.kr

* MAIN ENERGIA Inc., Korea
접수일자 : 2018년 5월 9일
최종완료 : 2018년 5월 29일

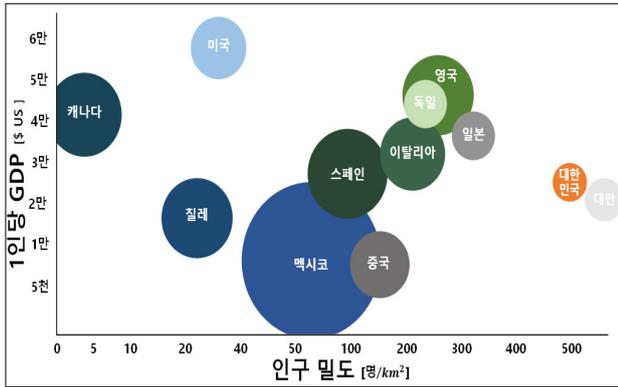


그림 1 주요국가 송배전 손실률
Fig. 1 Power loss rate of the major countries in the world

2.1 아시아

표 1은 아시아 대륙의 주요국가의 송배전손실률이다.

표 1 아시아 송배전 손실률 현황
Table 1 Power loss rate of the major countries in Asia

Country\ Year	2011	2012	2013
Korea	3.68	3.57	3.72
Japan	4.70	4.43	4.57
China	5.74	5.81	5.80
Taiwan	4.76	4.42	4.25

먼저 대한민국은 비교국가 중 송배전손실률이 가장 낮게 나타나며 2015년 기준 대한민국의 송전선로 길이는 210,164km이며 송전전압은 765, 345, 154kV 등으로 나뉜다. 대한민국은 국가의 면적에 비해 인구밀도가 비교국가 중 두 번째로 높다. 대한민국은 한국전력공사(KEPCO)가 전체 송전계통을 관리하고 있으며 다중환상망(Multi-loop) 형식의 신뢰도 높은 송전계통을 구축하고 있다. 1990년도 후반부터 765kV 대전력 송전망을 구축하고 있으며 2010년에 신안성-신가평 지역간 765kV 송전선로 건설 등 96개의 건설사업을 100% 완료하였다. 장기송전계획을 수립하여 기존 송전망의 손실감소와 설비용량 효율을 증진하고 있다. 또한 한국전력공사는 2001년에 발전부문을 6개로 분할하였으며 전력도매시장을 관리하는 한국전력거래소(KPX)가 설립되었다. 특징적으로는 국가지형상 인접국가와의 계통연계가 불가능하다.

일본은 총 10개의 일반전기사업자가 전력사업을 도맡아 일본전역의 전력을 공급하고 있다. 그 중 동경전력(TEPCO)은 전체 설비용량, 판매량이 가장 높은 비율을 차지하고 있으며 2015년 기준 송전선로 길이는 20,708km이며 송전전압은 500, 275, 154kV 등으로 나뉜다. 동경전력은 가공 송전선의 지중화율을 높이는 사업을 통해 도교 내 송전선의 90% 이상의 지중화를 진행하였다. 또한 송전손실을 줄이기 위해 500, 275kV 전압을 채용하여 건설하였다.

중국은 송전부문은 국가전력공사(SGCC)와 중국남방전망공사(CSPG) 2개사로 구분된다. 남북을 기준으로 국가전망공사는 북쪽지역, 중국남방전망공사는 남쪽지역을 담당한다. 국가전망공사의 경우 중국의 88% 지역에 전력을 공급하고

있다. 2015년 기준 국가전망공사의 송전선로 길이는 889,900km이며 750, 500, 330, 200kV 등으로 나뉜다. 송전망 확충과 관리를 통해 대전력 송전이 가능한 UHV망과 송전손실률을 절감하기 위해 Smart Grid 기술을 개발하여 안정적인 전력공급을 위해 노력하고 있다.

대만은 2015년 손실률이 눈에 띄게 낮아지며 대한민국과 유사한 손실률이 나타난다. 최근 송전손실률이 대한민국과 유사한 수준을 유지 중이다. 대만전력회사는 대만전력공사가 전체 97% 송전망을 가지고 있으며 대만 전역에 전력을 공급하고 있다. 발전소의 발전설비는 입찰을 통해 수급 중이며 국가입찰이 아닌 발전소 개별 입찰이 이루어지고 있다. 대만은 전체 에너지원의 약 99.4%를 수입에 의존하고 있어 다른 물가에 비해 전기요금에 상대적으로 비싼 편이다. 해외 기업과 계약을 하여 에너지 수급 안정화를 위해 프로젝트를 진행하고 있다. 대만 정부는 원자력발전을 줄이고 신재생에너지원을 확보해 전력수요를 충당하겠다는 계획을 수립하였다. 대만전력공사의 송전선로 길이는 17,412c-km이며 345, 154kV의 전압으로 구성된다. 대만전력공사는 손실률을 감소하기 위해 2023년까지 변전 자동화 및 배전 자동화 100%를 목표로 하고 있으며 AMI 설치를 진행 중이다. 이를 통해 2030년까지 전력손실비용을 약 113억원 감소하는 것을 목표로 하고 있다.

2.2 아메리카

표 2는 아메리카 주요 국가의 송전 손실률 현황이다.

표 2 아메리카 송배전 손실률 현황
Table 2 Power loss rate of the major countries in America

Country\ Year	2011	2012	2013
USA	6.00	6.30	5.95
Chile	7.13	5.02	6.69
Canada	8.85	8.49	8.64
Mexico	15.41	14.99	14.31

미국의 전력시스템은 동부, 서부, 텍사스 3개의 연계 시스템 중심으로 발전해 왔다. 이를 기반으로 지역송전기관, 독립계통운영자(ISO)들이 송전시스템을 운영하고 있다. 북미지역의 송전 시스템은 8개의 지역으로 구성되어 있으며 북미전력신뢰도위원회(NERC)의 감독 하에 관리 되고 있다. 동부, 서부, 텍사스의 연계 시스템은 직류 송전망으로 연결되어 있으며 각 연계 시스템 내에서 전력은 교류 송전망을 통해 전력공급이 된다. 그 중 New York Independent System Operator(NYISO)는 뉴욕시와 뉴욕시티, 롱아일랜드 지역을 운영하며 인접 4개의 ISO지역과 연계하여 계통을 운영하는 기관이다. 2015년 기준 송전선로 길이는 17,841km이며 송전전압은 345, 138, 115kV등으로 나뉜다. 송전손실을 감소하기 위해 Smart Grid를 통해 시스템상황 정보를 쉽게 파악하여 신뢰도와 효율을 향상시키기 위해 노력 중이다. 미국의 경우 노후화된 발전설비 및 송전설비에 대한 교체가 필요하며 늘어나는 신재생에너지원과 환경규제에 따른 계통운영 변화에 대응해야 하는 과제를 안고 있다.

칠레의 경우 국가가 최북단과 최남단 사이의 길이가 길다는 지형적 특성을 가지고 있다. 칠레는 세계 최초로 전력사

업을 민영화한 국가이다. 전력시장은 발전, 송전, 배전 3개 부문으로 구분되며 독점 방지를 위해 전력관련 기업이 3개 부문 중 2개 부문에서만 활동할 수 있도록 규제하고 있다. 칠레 송전망은 북부 SING, 중부 SIC, 남부 Aysen, 최남단 Magallanes 등 4개 그리드별로 분리되어 운영되고 있다. 그 중 Transelec는 칠레 최대 송전기업으로 송전선로 길이는 9,592km이며 송전전압은 500, 200, 154kV등으로 나뉜다. 그 외 회사로 Transmet, STS, Transchile, Transmel 등이 있다. Transelec는 2,900c-km의 송전선로를 보유하고 있으며 500, 230, 115kV 전압으로 구성된다[7].

캐나다는 수력자원이 풍부하며 수력을 중심으로 발전원 개발이 이루어졌다. 이후 다른 발전원 개발로 수력 발전의 비율이 현저히 줄었지만 현재에도 세계 최고의 에너지 자원 국가라 할 수 있다. 국내 수요를 모두 충당하고 남은 전력을 수출하고 있으며 이는 전체 수출의 24%를 차지한다. 10개의 주요 전기사업자가 있으며 발전, 송전, 배전을 통합 담당하고 있다. 그 중 Hydro One는 송전선의 97%를 차지하고 있는 회사이다.

멕시코는 Comision Federal de Electricidad(CFE)이 독점하고 있다. 전국의 발전 및 송배전 인프라를 국가전력시스템(SSE)이라 명명하고 전국에 전력수요를 공급하고 있다. 이중 230kV 송전망 2개를 연계하여 운영하고 있으며 이를 통해 수입, 수출을 하고 있다.

2.3 유럽

표 3은 유럽 주요 국가의 송전 손실률 현황이다.

표 3 유럽 송배전 손실률 현황

Table 3 Power loss rate of the major countries in Europe

Country\ Year	2011	2012	2013
Germany	4.41	4.25	4.22
UK	7.82	8.08	7.85
Italy	7.26	7.38	7.67
Spain	9.26	9.05	9.27

독일은 900여개의 전력회사들이 있으며 크게 대규모 전력회사인 E.ON, PWE, Vattenfall, EnBw와 소규모 전력회사로 구분된다. 가장 넓은 지역에 송전망이 있는 송전회사 TenneT의 경우 HTSC cables, 380kV 지중화 프로그램, 변전소 열적 손실 냉각 시스템, 인접국가와 계통 연계 시 송전 혼잡용량 계산 등을 통해 손실저감 및 효율적인 송전을 위해 노력하고 있다.

영국은 현재 6대 전력회사인 EDF, E.ON, NPOWER, Scottish Power SSE, British Gas중심으로 산업구조가 정착되어 있다. 송전계통의 경우 National Grid Electricity Transmission(NGET)사가 영국 본토의 송전계통을 운영한다. 송전선로 길이는 7,890km이며 송전전압은 400, 275kV 등으로 구성된다. NETG는 스코틀랜드와의 HVDC 신설, 변전소 개선, 효율이 좋지 않은 선로교체 등 송전망 관리를 통해 손실개선 및 효율적인 전력공급을 위해 노력하고 있다.

이탈리아는 에너지의 80%를 수입에 의존하고 있다. 이탈리아의 전력부문은 1999년 Bersani Decree가 발효되면서 전

력자유화가 시작되었다. 송전부문의 경우 Enel에 의해 독점되었으나 분할되어 이탈리아 고압송전망 소유 및 운영기관으로서 Terna가 설립되었다. Terna는 이탈리아의 송전설비의 약 90%를 소유, 운영하고 있으며 송전선로 72,600km이며 송전전압은 380, 220kV등으로 나뉜다. Terna는 매년 송전망 및 발전 계획을 수립하여 송전망 증가, 송전용량 증가를 목표로 하고 있으며 손실감소를 위해 대도시의 전력망 업그레이드, 인접국가와의 HVDC 연계를 진행하고 있다.

스페인인 체르노빌 사고 이후 신규 원자력 발전을 정지했다. 기존의 원자력 발전의 경우도 발전비율을 줄일 방침을 밝힌 바 있지만 발전량의 일정 수준을 유지할 것으로 예상된다. 송전망은 Red Electrica De Espana(REE)에 의해 운영되며 OMEL과의 연계를 통해 송전망의 안정적인 운영을 하고 있다. 현재 스페인은 동부 섬 지역 간 전력망 연결 및 북 아프리카 전력망 연결에 대한 계획을 가지고 있지만 전력수요가 지속적으로 감소하여 실행하지 못하고 있다. 신재생에너지발전원의 증가로 송전망을 확장하고 있다. 그러나 경제 상황 및 전력수요량 감소로 인해 전력수요를 충당하고 남은 전력을 수출하고 있다.

3. 송전손실 분석방법

송전손실 분석은 앞서 말한 바와 같이 부하지속곡선 이용[2], 조류 흐름 추적[3], Jacobian활용[4], Z-버스[5], 버스 체계 손실 할당 법[6]등 여러 방법이 연구되었다. 본 논문은 부하데이터 기반 송전계통의 발전, 부하, 손실량을 분석한다. 부하데이터 기반 송전손실 분석은 부하데이터를 어떻게 분류하는가에 따라서 데이터의 정확도가 달라진다.

3.1 전력부하 분석기법

부하분석에는 다양한 방법이 있으며, 그 중 그림 2의 부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)은 시간에 따른 부하곡선을 부하의 크기순으로 재배치하여 나타낸 것이다[8]. 세로축은 부하의 크기, 가로축은 시간으로 표기되며 곡선은 단조 감소하는 형태를 갖는다. 이를 통해 전체 피크부터 기저부하까지 전체 시간에 대한 부하데이터를 수집한다. 전력 부하 분석은 총 세가지로 나뉜다.

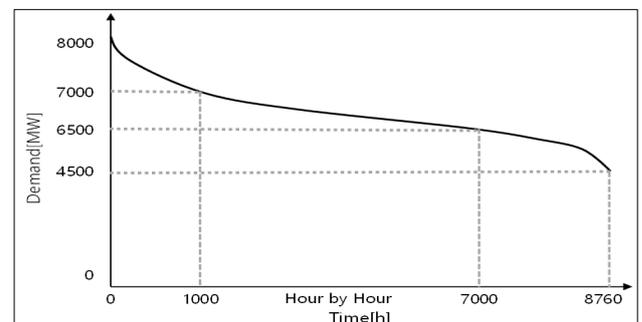


그림 2 부하지속곡선

Fig. 2 Load duration curve

먼저 피크 값의 부하량만을 이용하여 송전계통을 시뮬레이션하여 계통의 발전량, 부하량, 손실량을 분석한다. 두 번

제는 계절별 또는 전체 LDC를 구간을 나누어 5~6개 정도의 부하량 데이터를 기반으로 계통을 시뮬레이션하여 계통데이터를 분석하는 방법이다. 이는 피크 값만을 이용한 분석기법보다 정확한 값을 산출가능 하다. 마지막으로 시간별 전체 부하량 데이터 측정을 통해 얻은 시간별 부하데이터를 기반으로 계통을 시뮬레이션 하는 것이다. 이는 위의 두 가지 방법보다 정확한 결과를 얻을 수 있고 LDC의 전체 데이터라고 할 수 있다. 그러나 신뢰성 있고 정확하며 충분한 양의 데이터가 확보되어야 하며 실시간 계통정보, 계통 설비별 정확한 파라미터 값이 필요하며 시간이 많이 소모된다는 단점이 있다[9].

3.2 전력조류 분석기법

전력조류 분석기법은 발전과 수요가 일치하며 모선의 전압이 정격을 유지, 발전기는 제약조건 안에서 운전, 송전설비는 과부하상태가 되지 않아야 한다는 조건을 만족해야 전력계통의 모든 설비의 유효, 무효 전력조류와 손실을 산출할 수 있다. 이는 Power Flow와 Optimal Power Flow로 나뉘며 가우스 자이델, 뉴턴 랩슨법을 적용하여 시뮬레이션 한다 [10]. 둘 중 Power Flow는 계통데이터를 기반으로 목적함수 없이 오로지 전체 계통 내의 조류를 계산하는 것이며 Optimal Power Flow는 순동예비력조건, 안정성, 전압제약, 송전설비의 열적 한계 등의 운전 요건을 고려한 발전경제급전 시뮬레이션을 통해 조류계산이 가능하다[10].

3.3 송전손실 산출

송전계통에서의 손실을 계통 내에 존재하는 모든 전력설비에서 발생한다. 송전선로, 변압기, FACTS 등에서 손실이 발생하나 가장 설비의 개수 비중이 높으며 손실비중이 높은 설비가 송전선로와 변압기 이다. 따라서 본 논문은 시뮬레이션을 통해서 송전선로, 변압기의 손실을 분석하였다.

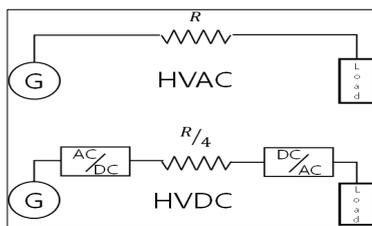


그림 3 HVAC와 HVDC
Fig. 3 HVAC and HVDC

송전선로는 크게 가공송전선로와 지중송전선로로 나뉘며, 그 중 가공송전선로는 도체, 절연체, 지지물 및 차폐선으로 구성된다. 송전선로의 저항손은 도체인 송전선로에 전류가 흐름에 따라 도체의 저항에 대한 손실을 말한다. 전력손실은 선로의 직렬저항에 의한 손실 과 가공선의 병렬요소로 존재하는 절연부분의 누설 컨덕턴스, 코로나의 컨덕턴스 및 케이בל의 유전손에 의한 손실 로 구분된다. 정격전압과 정격전류에서 운전되는 실제의 송전선로에서는 손실이 손실보다 훨씬 크다. 지중송전선로는 앞서 본 일본의 사례에서 보듯이 최근 많은 송전선로를 지중화를 진행하고 있으며 이는 기상

조건에 대한 선로의 약영향이 거의 없다는 장점이 크게 작용한다. 또한 송전선로는 선로에 AC, DC 가 흐르냐에 따라 선로의 종류가 달라지며 이에 따라 저항의 크기도 달라진다. 그림 3과 같은 HVDC의 경우 송전 효율이 HVAC에 비해 송전전압을 2배 올리면 송전능력은 4배 증가하며 손실을 1/4배로 줄어든다[11].

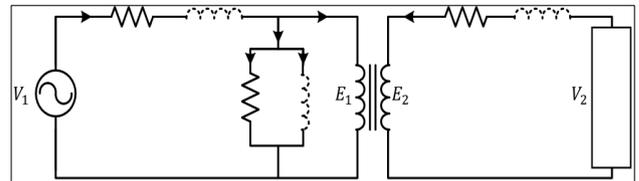


그림 4 2Winding 변압기 등가회로
Fig. 4 2Winding transformer equivalent circuit

다음으로 변압기는 철심의 양쪽에 코일이 감겨있어 일반적으로 각각 1차측, 2차측으로 정의하며 3차측까지 존재하는 변압기도 있다. 그림 4은 기본 2Winding 변압기의 등가회로이며 첨자 V1은 1차측 전압, V2는 2차측 전압을 나타낸다. 변압기는 전류를 흘려 전압을 1차측에서 2차측으로 전압을 승압 또는 강압하는 전기기기이다. 변압기의 손실은 동손과 철손이 존재한다. 동손은 주로 부하의 크기에 따라 결정되며 전류의 제곱에 비례하며 철심 양쪽에 감겨있는 코일에서 발생한다. 철손은 와전류손과 히스테리시스손으로 분류되며 부하전류와 관계없이 일정하고 1차 코일에 걸리는 전압의 제곱에 거의 비례한다[12].

4. 송전손실 예측기법

송전손실을 예측하기 위해서는 발전, 송전, 부하에 대한 데이터를 기반으로 전체 계통을 OPF 시뮬레이션을 통해 분석해야 한다.

4.1 송전계통 계획

전력시스템은 전기를 생산, 전송 및 공급에 이용되는 발전소, 송전선로, 변압기와 같은 설비가 연결되어 있는 네트워크이다. 따라서 전력시스템의 설계 및 계획에는 장기적인 관점에서 전력 수요를 충족시킬 수 있는 발전의 용량과 위치, 발전시기, 발전설비종류, 송전용량 설정이 적절해야 한다. 그러므로 안정적인 전력수급을 위한 설비확충, 적정예비율을 유지하기 위해 장기적인 계획이 수립되어야 하며 사회적, 환경적, 경제적 요인을 고려해 발전비용을 최소화 하며 효율적으로 전력공급계획을 세워야 한다. 먼저 발전계획은 수요에 적정예비율을 적용하여 적정설비규모를 설정하고 발전기의 기동정지계획을 고려해야 하며 필요하다면 신규 발전을 건설하는 것을 계획해야 한다. 송전계통에서 분산전원은 대부분 배전계통에 연계되어 부하량 절감으로 고려 가능하다. 따라서 태양광발전(Photo Voltaic, PV), 풍력발전(Wind Turbine, WT), 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS)와 같은 신재생에너지발전량을 고려해야 한다. 또한 온실가스 증가와 화석연료에 대한 발전의 의존성을 감안한 탄소 포집에 대한 것도 고려되어 계획을 수립해야 한

다. 탄소 포집의 경우 Carbon Capture and Storage(CSS)에 의한 계통계획도 고려된다[40].

송전설비계획의 경우 최근 전력시장의 규제완화와 신재생 에너지의 증가로 인해 송전계획 및 확충에 고려여건이 생겼다. 송전설비 또한 발전계획과 마찬가지로 안정적인 전력공급을 위해 적절한 설비를 선정하여 용량을 증대시키는 확충 계획, 수요 공급을 위한 적정설비 신규 증설계획이 필요하다. 또한 연계되는 발전소와의 계통제약 여건도 고려되어야 한다[13].

송전계통계획에서 가장 핵심적인 요소는 수요예측이다. 발전 및 송전설비계획은 모두 전력 수요를 안정적으로 공급하기 위함이며 전력수요예측이 적절할수록 발전 및 송전설비계획이 적절하게 될 것이다. 전력수요는 과거 데이터를 기반으로 예측가능하며 지구의 기온변화, 경제성장 속도, 전기요금, 인구증가율, 기상전망 등을 반영하여 진행되어야 한다[14].

대한민국의 경우, 1991년부터 장기 전력수급계획을 수립하여 발전, 송전, 수요에 대한 계획을 수립하였으며 총 5차 장기전력수급계획을 수립하였으며 2002년부터 전력수급기본계획을 2015년 7월까지 총 7차 전력수급기본계획이 수립되었다. 계획은 2년 단위로 수립·시행한다. 주요 내용은 전력수급의 기본방향, 전력수급의 장기전망, 발전설비 및 주요 송변전설비계획에 관한 사항, 전력수요의 관리에 관한 사항, 직전 기본계획의 평가에 관한 사항 등으로 이루어진다[15].

4.2 송전손실 예측 알고리즘

그림 5은 본 논문에서 제안하는 송전손실 예측 알고리즘이다. 앞서 말한 송전손실 분석기법, 예측기법을 기반으로 연도별 송전계통의 손실을 예측한다. 송전손실 예측 알고리즘은 발전계획, 송전설비계획은 확정적이며 변화에 큰 폭이 없지만 송전손실 예측에서 가장 주요한 수요예측에 대한 예측이 불확정적이다. 또한 부하량의 시간별 데이터가 존재하지 않는다. 최대 전력인 피크 부하량을 공급 가능하게 발전 및 송전설비를 계획하므로 피크 부하량에 대한 데이터만 존재한다. 따라서 송전손실 예측 알고리즘에서 부하량 예측은 피크 부하량만 존재하며 전력부하 예측기법의 마지막 방법인 부하단계별 LDC를 산출하여 확률론적으로 발생확률을 산출하여 전체 연간 부하량 및 발전량, 손실량을 산출한다.

송전손실 분석기법은 앞서 말한 바와 같이 과거 6년(2005)부하데이터를 기반으로 송전손실 예측 알고리즘의 타당성 및 예측오차율을 분석하기 위해 2015~2016년의 계통을 기반으로 제안한 알고리즘을 적용하여 송전손실률을 산출하였다. 송전선로, 변압기의 손실률을 각각 분석하여 진행하였으며 앞서 말한 송전계통의 손실을 발생하는 모든 설비 데이터를 기반으로 PSS/E 프로그램을 통해 OPF 시뮬레이션을 진행하였다. 표 4는 2015~2016년의 실제 대한민국 송전계통의 실제 피크 부하량, 송전손실률, 예측 손실률이다. 이때 피크 부하량은 신재생에너지발전량이 고려된 부하량이다.

본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용하였을 경우 오차율이 1.5%내외이며 신뢰할 만한 수준의 송전손실 예측 알고리즘이라 할 수 있다. 따라서 제 7차 전력수급기본계획에 따른

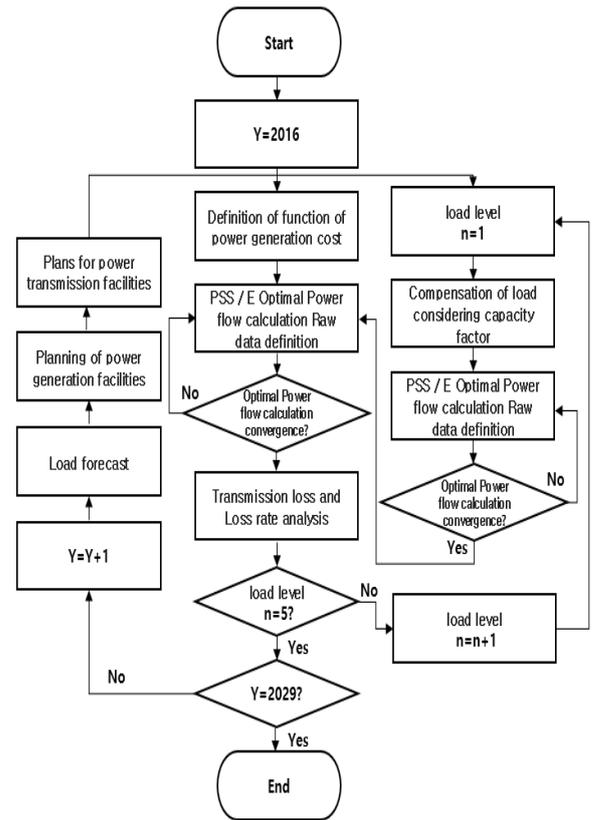


그림 5 송전손실 예측 알고리즘
Fig. 5 Transmission loss prediction algorithm

표 4 송전손실 예측 알고리즘 타당성 분석

Table 4 Feasibility analysis of transmission loss prediction algorithm

Country\ Year	2011	2012	2013
Germany	4.41	4.25	4.22
UK	7.82	8.08	7.85
Italy	7.26	7.38	7.67
Spain	9.26	9.05	9.27

송전손실 예측 방법이 타당하다는 결과를 얻을 수 있다.

5. 대한민국 관점에 대한 송전손실 예측전망

앞서 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하였다. 2015년 7월 대한민국 산업통상자원부 장관은 전력수급 안정을 위하여 제 7차 전력수급기본계획을 공고하였다. 계획기간은 2015~2029년(15년 장기계획)이며 주요내용은 전력수급의 기본방향, 장기전망, 발전설비 및 주요 송변전설비계획에 관한 사항, 수요관리 등으로 구성된다. 또한 신재생에너지 발전량 전망도 포함되어있다. 직전 수급계획의 평가로 2011년 9월 순환단전 이후 수급안정에 대한 요구 속에 발전설비 확충을 중점으로 추진되었다. 다만, 계획된 발전설비 적기 준공, 수요예측 정밀성 제고, 기후변화대응 등에 대한 개선 필요성이 제기되었다. 이에 제 7차 전력수급기본계획은 전력수급 위기의 경

협으로 전력수급 안정이 무엇보다 중요함을 강조하였고 특히 최대전력 수요는 평균 기온이 아닌 최고, 최저기온에 따라 결정되므로 기후변화 발생 가능성을 고려하였다. 또한 수요관리는 ESS, EMS 등 ICT기반의 에너지 신사업을 적극 활용하였으며 post 2020 온실가스 감축을 위해 저탄소 전원믹스를 강화하여 수립하였다.

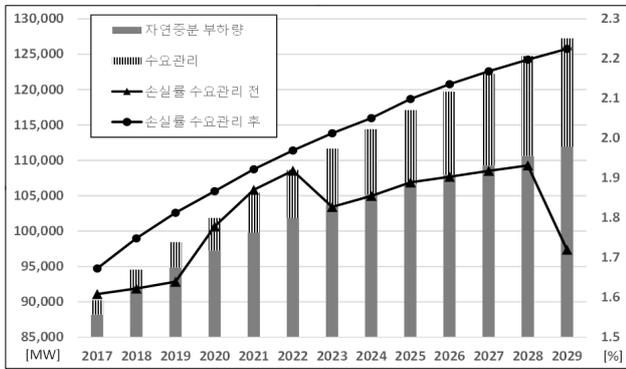


그림 6 대한민국 관점에 대한 송전손실
Fig. 6 The prospects for transmission loss in Korea

본 논문은 제 7차 전력수급기본계획을 기반으로 2015~2029년 간의 송전 손실량 및 손실률을 송전손실 예측 알고리즘을 적용하여 PSS/E OPF 시뮬레이션을 통해 연도별 송전손실률을 예측하였다. 그림 6은 각 예측한 부하량에 대한 손실률 예측 결과이다. 자연증분 부하량은 경제성장, 전기요금, 인구증가, 기상전망 등이 반영된 부하량이다. 이 부하량을 기준으로 수요관리를 통해 최대전력을 절감하기 위한 계획을 수립한다. 수요관리는 제 7차 수급기본계획에 정의된 ICT 기반 에너지신산업을 활용한 시장친화적 수요관리를 말한다. 이외 절전인식 확산, 효율향상, 전기요금 적정화, 스마트기기 확산 등을 포함한다.

현재 2016년 계통을 기준으로 2029년까지 발전 및 송전설비계획, 수요관리가 없을 경우 1.6~1.9%를 유지하는 송전손실률이 아닌 최대 2029년 2.2248% 증가할 것으로 전망된다. 그러나 제 7차 전력수급기본계획의 발전 및 송전설비계획이 이행될 경우 2029년 1.7199%의 수준으로 나타난다.

6. 결 론

본 논문에서 제안하는 송전손실 예측 알고리즘은 장기적인 송전계통의 계획을 기반으로 계통의 손실량 및 손실률을 산출하는 알고리즘이다. 예측한 송전손실률은 과거 송전설비 확충 데이터를 기반으로 추가적인 설비투자가 이루어지면 약 0.6% 저감이 가능할 것으로 전망된다. 그러나 일반적으로 계통계획은 손실량 저감만을 목적으로 시행되지 않는다. 따라서 추가적인 설비투자를 통해 달성된 손실률은 적절한 송전손실 예측이라 볼 수 없다. 또한 송전설비계획의 경우, 2024년 이후의 계획은 거의 수립하지 않는다. 이는 계획된 송전계획이 시행되는 가에 따라 제 8차 전력수급기본계획을 통해 재 계획된다. 이로 인해 급격히 손실률이 증가하는 것으로 나타난다. 그러나 2017년 정권이 교체됨에 따라 탈 원전 정책이 추진 될 것으로 보인다. 따라서 “제 8차 전력수급

기본계획”에는 탈 원전 내용이 적극 반영되어 점차적으로 폐쇄되는 원전이 증가할 것이며 부하 공급을 위해 원전을 대체할 다른 발전원의 증가가 전망된다. 이로 인해 부하 공급을 위한 전력조류의 흐름에 변화가 생기며 이러한 변화로 손실에 영향을 미칠 것으로 전망된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1C1A1A02037544).

References

- [1] Sobhy M. Abdelkader, Member, “Characterization of Transmission Losses,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, Feb. 2011.
- [2] T. K. Hahn, Student Member, IEEE, J. H. Kim, Student Member, IEEE, J. K. Park, Member, IEEE, “Calculation of transmission loss factor considering load variation,” *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2002.
- [3] S. Abdelkader, “Efficient computation algorithm for calculating load contributions to line flows and losses,” *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 153, no. 4, 13 July 2006.
- [4] Q. C. Lu, S. R. Brammer, “Transmission loss penalty factors for area energy interchange,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 3, Aug. 1996.
- [5] A. J. Conejo, F. D. Galiana, I. Kockar, “Z-Bus loss allocation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 1, Feb. 2001.
- [6] Y.-C. Chang, C.-N. Lu, “Bus-oriented transmission loss allocation,” *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 149, no. 4, July 2002.
- [7] Korea Power Exchange, “WORLD POWER MARKET TREND Yearly Republic of Chile,” Feb. 2016.
- [8] Gilbert M. Masters, “Renewable and Efficient Electric Power Systems,” 2004.
- [9] EPRI, “Assessment of Transmission and Distribution Losses in New York,” November 2012.
- [10] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Thomas Overbye, “Power System Analysis and Design,” 2012.
- [11] McGraw-Hill, “Electric machinery,” 2003.
- [12] Krishna Priya G. S., Santanu Bandyopadhyay, Raymond R. Tanb, “Power system planning with emission constraints Effects of CCS retrofitting,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, no. 5, pp. 447-455, September 2014.

- [13] Sara Lumbreras, Andrés Ramos, Fernando Banez-Chicharro, "Optimal transmission network expansion planning in real-sized power systems with high renewable penetration," *Electric Power Systems Research*, vol. 149, pp. 76-88, Aug. 2017.
- [14] Ergun Yukseltan a, Ahmet Yucekaya, Ayse Humeyra Bilge a, "Forecasting electricity demand for Turkey: Modeling periodic variations and demand segregation," *Applied Energy*, vol. 193, pp. 287-296, May 2017.
- [15] Ministry of Trade, Industry and Energy in Republic of Korea, "The 7th Basic Plan for Electricity Supply and Demand," July 2015.

저 자 소 개



김 성 열 (Sung-Yul Kim)

2007년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학과 졸업, 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2012년~2013년 미국 Georgia Institute of Technology, PSCAL 연구원. 현재 계명대학교 전기에너지공학과 조교수.
E-mail : energy@kmu.ac.kr



이 여 진 (Yeo-Jin Lee)

2016년 계명대학교 전기에너지공학과 졸업, 2018년 동 대학원 전기전자융합시스템공학과 졸업(석사). 현재 매인에너지(주) 근무.
E-mail : tyjkl06@gmail.com