

전력계통 내 관성확보를 위한 동기조상기 해외사례 검토 및 분석

전혜련*¹, 최동희*², 백승묵**³, 이수형***⁴, 이희진****⁵

An Analysis and Overseas Case Studies on Installation of Synchronous Condenser in a Power System for Improving Inertia

Hye-Ryeon Jeon*¹, DongHee CHOI*², Seung-Mook Beak**³, Soo-Hyoung Lee***⁴, and Hee-Jin Lee****⁵

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20203040010240, 해상 태양광 시스템 LCOE 저가화를 위한 부품 소재 국산화 개발과 실증)과 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20223A10100030, 측정기반 동기조상기 모델 구축 및 계통관성 운영기술 개발)

요 약

기후 위기 등의 다양한 문제에 대처하기 위하여 신재생에너지원 기반 분산전원 계통의 수용율이 증가함에 따라 전통적인 계통의 구성 및 운영과 많은 다른 특성들을 가지게 되었다. 신재생에너지원 기반 분산전원의 출력변동은 동기발전기의 투입율이 줄어든 상황에서 전력계통에 관성저하 문제를 일으킬 수 있다. 전력계통의 관성이 낮을 경우, 급격한 주파수 변동은 계통 내의 기기들에 대하여 문제를 일으킬 수 있을 뿐만 아니라, 저 주파수 부하 차단 등의 이벤트를 발생시켜 계통의 연속적인 사고를 야기할 수 있는 원인이 될 수 있다. 본 논문에서는 국내 전력계통 내 관성확보를 위한 동기조상기 설치를 위한 경제성 편익 분석을 위한 해외사례를 검토하였다. 아울러, 동기조상기의 신규설치 및 전환에 대한 단위 비용을 산정하여 국내 편익 분석을 위한 기초를 마련하고 그 비용을 해외사례와 비교 분석하였다.

Abstract

Power output fluctuations of distributed power sources based on renewable energy sources can cause a problem of inertia degradation in the power system as the installation rate of the synchronous generator is reduced. If the inertia of the power system is low, sudden frequency fluctuations can cause problems with devices in the system, as well as generate events such as low-frequency load shedding, which can cause continuous accidents in the system. In this paper, overseas cases were reviewed to analyze the economic benefits of installing synchronous condenser to secure inertia in the domestic power system. In addition, unit costs for new installation and conversion of synchronous condenser were calculated to prepare the basis for domestic benefit analysis, and the costs were compared and analyzed with foreign cases.

Keywords

synchronous condenser, inertia response, economic analysis, benefit analysis, installation cost

* 청주대학교 융합전자공학부
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0003-2660-7145>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0001-5911-8335>
** 공주대학교 전기전자제어공학부 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1359-3453>
*** 목포대학교 전기제어공학과 부교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5015-3310>

**** 금오공과대학교 전자공학부 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1306-8771>
· Received: Nov. 16, 2022, Revised: Dec. 12, 2022, Accepted: Dec. 15, 2022,
· Corresponding Author: Hee-Jin Lee
Dept. of Electronic and Electrical Engineering of Kumoh National
Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi-si, Gyeongbuk, Korea
Tel.: +82-54-478-7437, Email: jinlee@kumoh.ac.kr

I. 서 론

기후 변화에 대응하여 세계적인 노력의 일환으로 우리나라에서도 다양한 노력이 지속되고 있다. 우리나라에서도 풍력 및 태양광 발전원의 도입을 통하여 기후변화 위기에 대응하려 하고 있다. 하지만 태양광 및 풍력 발전은 대표적인 변동성 재생에너지(VRE, Variable Renewable Energy)로 태양광과 바람의 특성상 변동성이 매우 큰 특징을 가지고 있다. 이러한 VRE 기반의 발전원들이 전력계통에 높은 비율로 연계되기 위해서는 그 발전원의 전원구성에서 동기발전기의 비율이 낮아져야 한다. 전력계통내의 동기발전기의 비중이 낮아지게 되면 계통내의 전력불균형에 대해서 VRE 기반 발전원들의 높은 변동성에 대응하여야 한다. 그러나 제어를 통한 대응이 어려울 뿐만 아니라 낮아지는 관성으로 인하여 주파수의 변화가 높아지는 특징이 있다. 특히 높아지는 주파수 변화율(ROCOF, Rate of Changes of Frequency)은 계통에 다양한 문제를 야기할 수 있다. 좁게는 전력계통내의 다양한 기기들은 기기 자체의 보호를 위해서 ROCOF의 제한이 걸려 있어, 원치 않는 기기의 탈락이 유발할 수도 있다. 넓게는 전력계통 내의 전력 불균형에 대한 기존 기기들의 출력 제어가 발생하기 전 저주파수 부하차단등의 다양한 이벤트들의 연쇄적인 발생을 통하여, 전체 전력계통의 정전을 야기할 수 있는 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 VRE가 전력계통에 높은 비율로 연계가 된다면, 기존 동기발전기들의 발전원 구성을 대체하여 계통 전체의 관성이 낮아질뿐만 아니라, VRE에 따른 변동성이 커지는 어려움이 발생할 수 있다[1]-[3].

이러한 문제를 해결하기 위해서 계통에 관성을 제공해 주고자하는 다양한 접근 방식이 존재한다. 대표적으로 동기발전기 대신 계통의 전압제어와 관성을 제공해 줄 수 있는 동기조상기(SC, Synchronous Condenser) 기반의 물리적 관성을 제공해 주는 방법이 있다. 다른 방법으로는 VRE 기반 발전원들에 대한 합성관성을 제공해주는 방법이 대표적인데, 합성관성은 물리적인 관성응답을 제공해 주지 못할뿐만 아니라 측정, 감시, 제어 기반의 응답으로써 다양한 고장이 존재할 수 있다. 특히, 에너지저장장치시스

템은 전기화학적 특성으로 인하여, 화재 위험이 존재하므로 기술적으로 더욱 개선되어야 하는 부분이 있다. 해외의 경우, VRE 기반 발전원의 더 높은 수용으로 인하여 계통의 관성 문제가 먼저 발생하였고, 이를 극복하기 위한 수단으로써 동기조상기의 설치가 되고 있다. 동기조상기는 계통의 전압조정과 관성제공이 가능하기 때문에 VRE가 대규모로 연계된 지점에서의 보강을 통하여 계통의 VRE 연계에 따른 다양한 문제들에 대한 좋은 대안으로 간주된다[1]-[3].

이러한 흐름에 발 맞추어, 현재 국내에서도 동기조상기 설치를 통한 관성 개선에 관한 연구가 진행되고 있으며, 이를 위한 선행 연구로써, 동기조상기 설치를 위한 경제성 평가 또한 필수적이다. 경제성 분석은 다양한 분석방법이 존재하나, 전력계통 관점에 다양한 요소들을 고려하였을 때 가장 기본적인 수행되는 것이 편익 분석이다. 편익 분석을 위해서는 해당 설비들의 설치비용에 대한 정확한 평가가 선행 되어야 한다. 본 논문에서는 이를 위하여 동기조상기의 경제성 평가를 위한 선행연구로써의 설치비용에 대하여 해외사례를 중심으로 검토하고자 한다. 이를 바탕으로 동기조상기 설치 및 전환에 대한 비용을 추정하고, 계통의 관성 관점에서 설치된 기기의 관성 기여도를 평가하기 위하여 관성에 의한 운동에너지량을 산정하는 방법을 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 전력계통내 상정사고 시 주파수 응답의 일반적인 특성 및 전력계통 내의 예비력의 종류에 대해서 그 영향성을 분석한다. 3장은 계통에 관성을 제공해 줄 수 있는 동기발전기 및 동기조상기의 구조에 대하여 검토를 하고 이를 바탕으로 4장에서 해외의 동기조상기 설치 사례에 대하여 검토를 진행한다. 5장에서는 동기조상기 설치를 위한 경제성분석을 진행하고 결론을 제안 하였다.

II. 전력계통 내 관성의 영향성

전력계통 내의 주파수는 계통 내의 전력 불균형에 대한 정보를 나타내주는 하나의 판단기준으로써 정상 주파수 근처에서 운영되어야 한다.

이러한 주파수는 발전기 탈락 혹은 부하 탈락 등의 전력계통 내의 사고 발생 시 주파수가 변하여 계통의 상태를 나타내게 된다. 그림 1의 위 그림은 전력계통 내 발전기 탈락과 같은 상정사고 시 주파수 응답을 나타내며, 아래 그림은 주파수 하락에 따른 발전기의 응답을 나타낸다. 발전기 탈락과 같은 전력 불균형이 계통에 발생하였을 때 주파수는 하락하며, 이 때 주파수의 변화율(ROCOF)은 계통의 관성과 밀접한 관계를 가지고 있다. 계통 내의 확보된 관성과 주파수 하락에 따라서 응답하는 발전기의 응답이 아래 그림의 '1차 주파수 제어'로 나타난다. 기존 동기발전기만 연계되어 있는 전통적인 전력계통에서는 이러한 '1차 주파수 제어' 응답은 동기 발전기의 관성에너지와 주파수 하락에 자연 응답하는 조속기 응답으로 이루어진다.

그 이후 '2차 주파수 제어'는 발전기의 자동 발전 제어를 통하여 발전기 탈락에 따른 전력 불균형을 해소시키기 위한 발전이 진행되며, '3차 주파수 제어'를 통하여 소모된 자동 발전 예비력을 보강하는 것이 일반적인 흐름이다.

만약 계통의 관성이 저하되어 주파수의 변화가 매우 큰 계통이라면 이러한 전력계통의 운영이 불가능할 수 있다. 특히, 전력계통의 불균형이 VRE

기반 발전원의 높은 수용률에 따라 계통의 ROCOF가 높아지고 이런 상황이 다양한 계통의 연쇄적인 상정사고를 야기할 경우, 전력계통 전체의 정전이 발생할 수 있다. 이러한 상황을 막기 위하여 전력계통 내의 적정 관성을 유지하는 것이 필수적이며, VRE 기반 발전원의 계통 내 수용률 증가는 계통의 변동성 증가 뿐만 아니라 동기발전기 감소에 따른 문제에 대응할 필요가 있다. 이에 동기조상기가 전력계통에 관성제공 및 다양한 계통 강화를 제공해주는 수단으로 각광 받고 있다.

III. 동기발전기 및 동기조상기의 구조

3.1 동기발전기 구조

동기발전기는 원동기로부터 생산한 기계적 에너지를 일정한 전압과 주파수로 제공되는 전기적 에너지로 전환하는 기기이다. 동기발전기의 구조는 그림 2와 같이 기동 모터, 발전기, 여자기, 터빈, 압축기로 구성된다[4].

동기발전기의 압축기는 연소하는 과정에서 공기를 끌어 압축한 다음 연소실에 고압으로 공급하여 연소 불꽃의 강도를 높이는 역할을 한다.

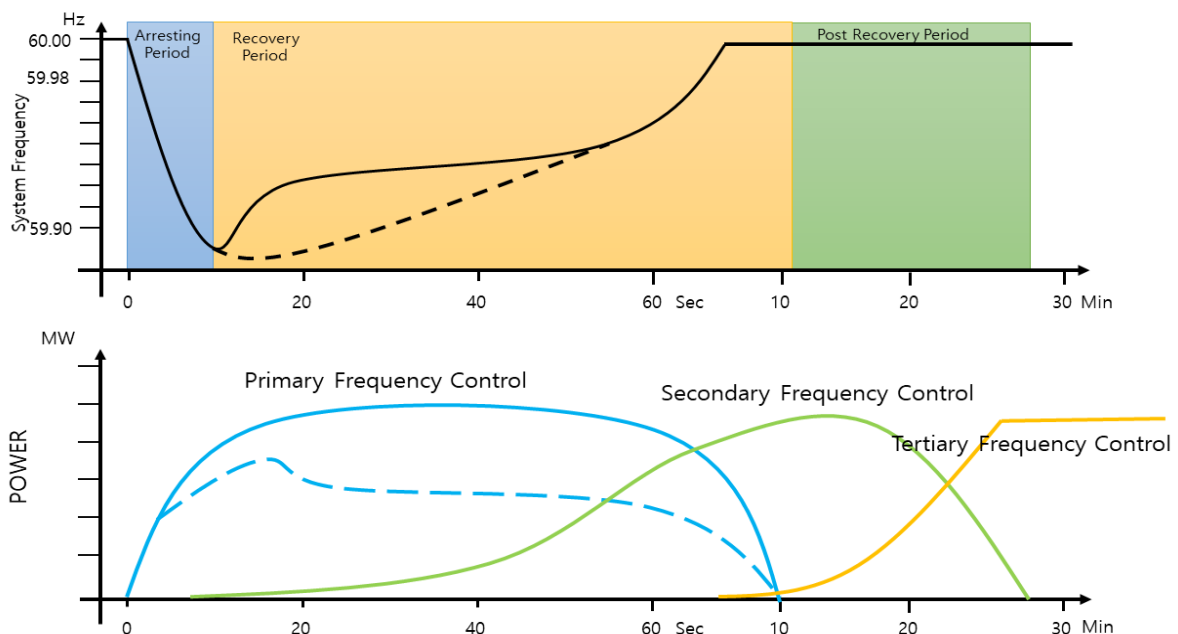


그림 1. 전력계통 내 상정사고 시 주파수 응답(위) 및 예비력(아래)
 Fig. 1. Frequency responses(up) in a contingency and power system reserves(down)

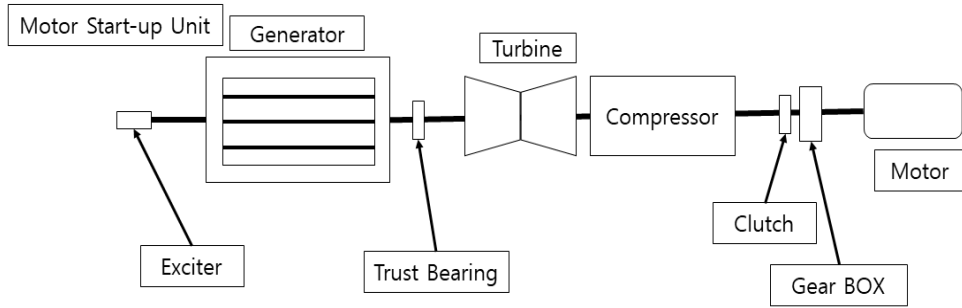


그림 2. 동기발전기의 구조
Fig. 2. Diagram of synchronous generator

이후, 연소 된 가스로 터빈을 구동함으로써 동력을 얻어 발전기가 회전하게 된다. 동기발전기의 여자기는 발전기 계자 권선에 직류 전류를 공급하여 발전기의 유효 기전력의 크기를 제어하는 것으로 계통의 안정적인 전압을 유지 시킨다.

이러한 기능들로, 동기발전기는 계통에 전력을 공급하는 것뿐만 아니라 계통의 주파수와 PF(Power Factor)를 안정적으로 유지하기 위해 사용된다.

3.2 동기조상기 구조

동기조상기는 샤프트에 부하를 부착하지 않은 상태로 회전하는 동기 모터이다. 따라서, 그림 3과 같이 기동기, 발전기, 여자기로 구성된다. 그림 2의 동기발전기와는 다르게 터빈을 통한 원동기의 기계적인 에너지 공급없이 운행하는 것이 특징이다. 따라서 동기조상기의 계통 연계 운영을 위해서는 기계적인 주파수와 전기적인 주파수를 고려하여 연결하는 것이 필요하다. 이를 위하여 동기조상기의 기동방식은 두가지 방식으로 분류된다. 동기조상기의 기동방식은 기동 모터를 이용하여 기동하는 형태와 주파수 조절이 가능한 가변 주파수 드라이버(AFD, Adjustable Frequency Driver) 형태가 있다.

동기조상기는 여자기를 제어하여 계통에 무효전력을 제공하거나 흡수할 수 있다. 이러한 특징을 기반으로 동기조상기는 계통의 전압을 조정하는 역할로 기능하였다. 아울러 동기조상기는 물리적인 회전체가 존재함에 따라 계통에 물리적인 관성을 제공할 수 있고, 이는 VRE 기반 발전원이 다수 포함된 계통에서 관성을 보장하는 방안으로 검토된다[5].

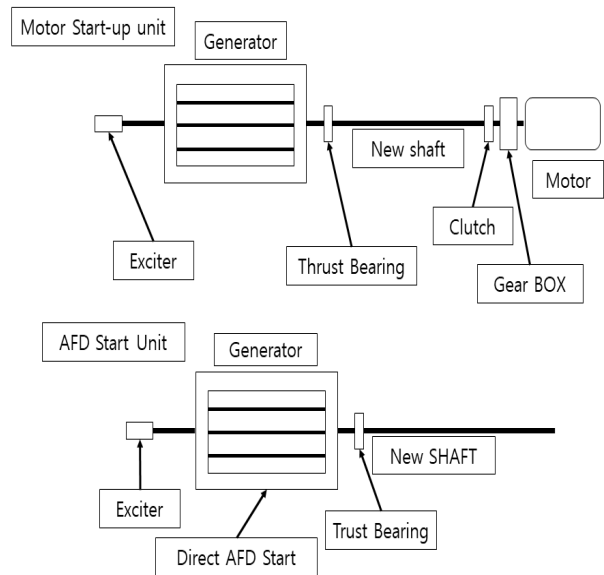


그림 3. 동기조상기의 구조 - 모터 드라이브 방식(위) 및 가변주파수드라이브 방식(아래)
Fig. 3. Diagram of SC - motor drive method(above) and AFD method(below)

IV. 동기조상기 해외사례 분석

4.1 동기조상기 설치 사례

이탈리아의 계통운영자(TSO, Transmission System Operator)인 Terna가 계통 보강 및 관성 보강을 목적으로 동기조상기를 그림 4에 위치한 Matera 지역에 2대, Manfredonia 지역에 1대, 총 3대를 2022년에 설치 완료 예정이다. 해당 프로젝트 비용은 840억(70 M\$)으로 추정되며, 각각의 설비 사양이 동일하기 때문에 한 대의 설치비용은 280억으로 추정 가능하다.

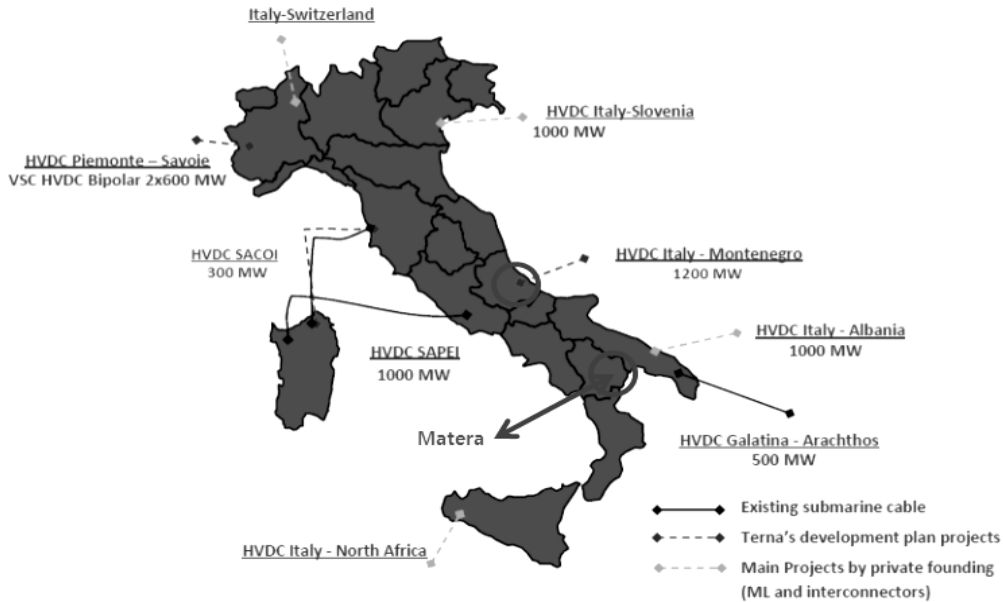


그림 4. 이탈리아의 동기조상기 설치 사례
 Fig. 4. Examples of SC installation in Italy

이탈리아의 동기조상기는 계통의 강건성을 보장하기 위한 목적으로 높은 관성을 제공해 주기 위하여 플라이휠을 결합한 형태이며, 동기조상기 1대의 정격 용량은 250[MVA]이고 관성 상수는 7[sec.]이다 [6][7].

호주의 TSO인 AEMO(Australia Energy Market Operator)가 계통 보강 및 관성 보강을 목적으로 그림 5와 같이 Davenport 지역에 2대, Robertstown 지역에 2대, 총 4대를 2020년에 설치를 완료했다. 해당 프로젝트 비용은 1342.8억(111.9 M\$)으로 추정되며, 1대 신규 설치비용은 335.7억으로 추정된다. 호주의 동기조상기 또한 계통 관성 보강을 목적으로 플라이휠을 결합한 형태이며, 동기조상기 1대의 정격 용량은 129[MVA]이고 약 8.5[sec.]의 관성상수를 가진다[8][9].

에스토니아의 TSO인 Elering이 계통 보강 및 관성 보강을 목적으로 동기조상기를 2024년까지 그림 6과 같이 Püssi 지역, Küssi 지역, Virus 지역에 1대씩, 총 3대 설치할 예정이다. 해당 프로젝트의 설치비용은 1002억(83.5 M\$)으로 추정된다. 동기조상기 1대의 정격 용량은 305 [MVA]이며, 계통 보강을 위해 플라이휠을 결합한 동기조상기이기 때문에 관성 상수가 6.23[sec.]이다[10][11].



그림 5. 호주의 동기조상기 설치 사례
 Fig. 5. Examples of SC installation in Australia

4.2 동기조상기 전환 사례

미국의 First Energy가 Ohio의 노후 발전설비 5기를 계통 보강(전압보강)을 위해 2016년에 Eastlake Power Plant 지역의 폐지 설비를 동기조상기로 전환을 완료하였다. 그림 7은 발전기를 동기조상기로 전환한 지역의 위치를 나타낸다. 해당 프로젝트의 총 전환비용은 1200억(100 M\$)으로 추정된다. 동기조상기의 5대의 총 설비용량은 1400[MVA]이다[12].

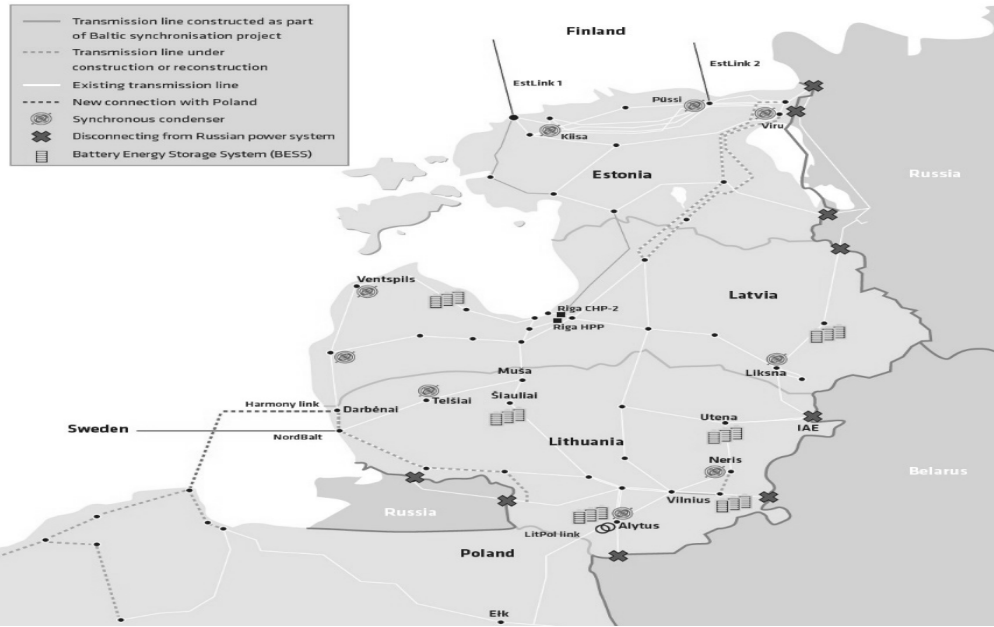


그림 6. 에스토니아의 동기조상기 설치 사례
Fig. 6. Examples of SC installation in Estonia

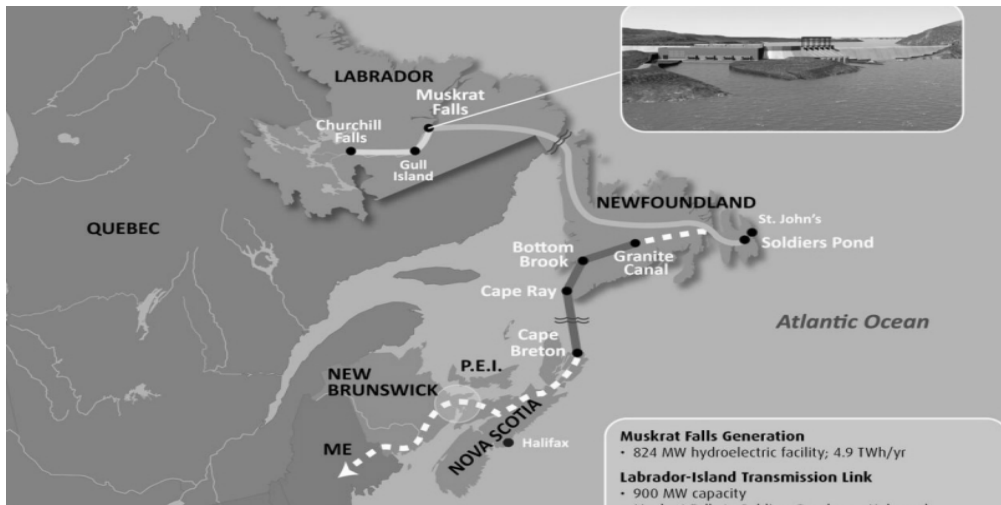


그림 8. 캐나다의 동기조상기 설치 위치
Fig. 8. Examples of SC installation in Canada

Power plants slated for closure

FirstEnergy Corp. plans to close six coal-fired power plants by Sept. 1. Four of the plants are in Ohio.



그림 7. 미국의 동기조상기 전환 위치
Fig. 7. Examples of SC conversion in U.S.A

캐나다의 Nalcor Energy가 계통 보강 및 관성 보강을 목적으로 Lower Churchill Hydroelectric Project를 통하여 2014년에 Holyrood 지역의 발전기 2대를 동기조상기로 전환하였다. 그림 8은 프로젝트를 실행한 사례를 나타낸다. 해당 프로젝트의 비용은 약 68.98억(5.748 M\$)으로 추정된다. 동기조상기 2대의 정격 용량은 194.445[MVA]이며, 관성 상수는 1.182 [sec.]이다[13].

표 1. 동기조상기 신규 및 전환 비교

Table 1. Comparison of installation cost and conversion cost of SC

	New installation(including flywheel)			SC conversion	
	Italy	Australia	Estonia	U.S.A	Canada
Rated capacity [MVA]	750	516	915	1,400	194
Inertia energy [MW·s]	5250	4400	5700	-	460
Capex (As of 2022) [million Won/MVA]	840	1342.8	951.6	1399.68	84.48
Average capex (As of 2022) [million Won/MVA]	111.6	283.68	104.04	99.96	43.56
Purpose	Reinforcement of power system and inertia			Reinforcement of power system (voltage)	Reinforcement of power system and inertia

앞의 사례들을 정리하여 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 표 1은 각각의 사업비에 물가상승률 2.6%를 고려해서 비교한 표이다. 사업비의 경우, 나라마다 다른 요소들 때문에 크게 차이 날 수 있다. 표 1에서 신규 설치의 경우 호주의 사례가 상대적으로 설치비용이 높게 추정되었다.

그 이유는, 태양광 발전소의 안정성을 위해 변전소를 포함한 동기조상기 시스템 전체를 새로 건설하였기 때문에 비교적 사업비가 높게 추정된다. 다른 국가의 경우에는 동기조상기를 기존의 변전소에 설치하였기 때문에 설치비용이 실제 동기조상기의 설치비 및 건설비가 상대적으로 적게 고려되었을 것으로 판단된다. 표 1의 전환사례의 경우 미국의 전환사례는 발전소 건설연도가 1920년대로 추정되며, 발전설비가 오래되어 보강 비용이 높았을 것으로 추정된다. 따라서, 표 1의 동기조상기 신규설치의 이탈리아, 에스토니아 사례와 동기조상기 전환의 캐나다 사례의 추정된 설치 비용에 대하여 경제성 분석을 진행하였다.

V. 동기조상기 설치를 위한 경제성 분석

5.1 동기조상기 설치 및 전환 비용

표 2는 [5]에 따른 2012년 기준 300 [MVA] 동기조상기 신규 설치 비용이다. 동기조상기 신규 구매 비용이 가장 큰 비중을 차지하고, 동기조상기의 연계를 위한 설비 비용이 그 다음을 차지하는 것을 알 수 있다. 해당 비용이 산정된 연도로부터 물가상

승률을 약 2.6%로 가정하여 2022년 현재 기준의 설치비용 총액을 산정하였고, 그 금액은 118.8억으로 추정된다[5].

표 2. 동기조상기 신규 설치 비용

Table 2. Installation cost of synchronous condenser

Rated capacity	300 [MVA]
Installation cost	
Construction cost	420 million Won
Equipment costs	
SC	5500.8 million Won
Cooler	1044 million Won
Spare parts	34.8 million Won
13.8 kV switchgear & starting reactor	1352.4 million Won
13.8 kV Bus	62.4 million Won
Total direct cost	8414.4 million Won
Engineering cost	57.6 million Won
Reserve cost	
Cost	687.6 million Won
Total cost	
Total cost in 2012	9159.6 million Won
Total cost conversion to 2022	11880 million Won

표 3은 [5]에 따른 2006년 150[MVA] 동기조상기 전환 비용이다. 동기조상기는 3장에서 확인할 수 있듯이, 동기발전기와 유사한 구조를 가지고 있고, 적절한 설계변경을 통하여 동기발전기를 동기조상기로 전환하는 것이 가능하다. 이 때, 동기발전기를 동기조상기로 전환할 경우 가장 큰 비중을 차지하였던, 동기조상기 신규 구매비용이 절감되는 것을 확인할 수 있다.

표 3. 동기조상기 전환 비용

Table 3. Conversion cost of synchronous condenser

Rated capacity	150 [MVA]
Installation cost	
Construction cost	240 million Won
Equipment costs	
SC	-
Cooler	-
Spare parts	-
13.8 kV switchgear & starting reactor	-
13.8 kV Bus	-
Start-up drive	120 million Won
Thrust bearing	60 million Won
New exciter	120 million Won
Total direct cost	270 million Won
Engineering cost	57.6 million Won
Reserve cost	
Cost	687.6 million Won
Total cost	
Total cost in 2006	3445.2 million Won
Total cost conversion to 2022	5196 million Won

다만 해당 설비에 대한 전환비용인 표 3은 새로운 여자기 구매를 가정하였기 때문에 전환비용은 동기발전기가 가지고 있는 여자기의 상태에 따라 달라질 수 있다. 해당 비용이 산정된 연도로부터 물가상승률을 약 2.6%로 가정하여 2022년 현재 기준의 전환비용 총액을 산정하였고, 그 금액은 51.96억으로 예상된다.

다만, 관성확보 목적의 동기조상기 전환에서 동기 조상기의 부족한 관성을 보강하기 위하여 플라이휠을 연계하여 시스템을 구성하는 경우가 있다. 이러한 경우 플라이휠에 대한 비용을 고려하여 하는데, 플라이휠의 설치비용은 물리적인 질량을 가진 회전체에 대한 에너지 비용과 해당 에너지를 전력으로 교환하기 위한 전력비용으로 구성되며 아래와 같이 표현할 수 있다[14].

$$Cost = EC_{FW} + PC_{FW} \quad (1)$$

에너지 비용(EC, Energy Cost)은 회전체, 외함, 진공장치 등의 비용으로 구성이 되며, 전력 비용(PC, Power Costs)는 인버터 등의 전력 변환비용이 포함된다. 이 때, 동기조상기에 플라이휠 보강을 통하여

관성 보강을 할 경우 별도의 전력비용이 포함되지 않기 때문에 에너지 비용만 고려할 수 있다.

5.2 동기조상기 설치 및 전환 추정 비용 비교

이탈리아 사례의 동기조상기 정격용량 250 [MVA]에 대하여 플라이휠을 통한 관성보강으로 관성 상수 7[sec.]을 갖는 동기조상기에 대한 설치비용에 대한 검증을 진행하였다.

동기조상기의 설치 비용을 산정하는 방법은 앞장의, 동기조상기 설치 또는 전환비용과 플라이휠 보강 비용을 고려하여 해외사례의 설치비와 교차 검증 하였다. 따라서, 동기조상기의 설치 및 전환 비용은 100[MVA] 단위용량 비례하여 증가한다고 가정하였을 때, 추정되는 250[MVA] 동기조상기의 신규 설치 및 전환 비용은 각각 99억원과 86.6 억원이다.

동기조상기는 동기발전기에서 터빈이 제거된 형태이기 때문에 관성상수가 일반적으로 높지 않으며, 동기 조상기의 관성상수를 1.75[sec.]라고 가정하였을 때, 플라이휠을 통한 관성 보강이 필요하다. 이 때, 플라이휠을 통하여 증가해야 하는 관성 상수의 양은 5.25[sec.]라고 가정할 수 있다. 이를 바탕으로 관성보강용 플라이휠의 에너지가 1312.5[MWs] (0.364[MWh])임을 알 수 있다. 따라서, 플라이휠의 에너지 비용을 12억원/MWh이라고 가정하였을 때, 250[MVA]의 동기조상기의 관성상수를 7[sec.]로 증가시키기 위한 플라이휠의 관성보강 비용은 4.32억 원으로 추정 하였다.

따라서, 동기조상기 신규설치 및 전환비용을 표 4와 같이 추정을 하였다.

표 3과 표 4를 비교하였을 때, 표 4에서 신규 설치의 경우 100 [MVA]당 평균 사업비의 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 신규 설치의 경우 단순 동기조상기의 기기 및 보조기기의 설치 뿐만 아니라 설치 환경을 고려한 건설비의 차이인 것으로 판단된다. 다만, 전환비용의 경우 상대적으로 유사한 금액으로 추정된 것으로 판단되며, 이는 전환의 경우 설비 자체의 전환 비용이 주된 비용이고, 별도의 건설비 등의 고려요소가 적기 때문이라고 판단된다. 하여 11.5%의 비용을 절감할 수 있음을 알 수 있다.

표 4. 동기조상기 신규설치 및 전환비용 예측

Table 4. Prediction cost of SC installation and conversion

	New installation cost (SC+Flywheel)	Conversion cost (SG->SC+Flywheel)	Note
Total inertia energy[MWs]	1750		250 [MW]×7 [sec]
SC cost as of 2022 (estimation) [100 million]	99.048	87	Assumption SC inertia: 1.75[sec] Flywheel inertia: 5.25 [sec]
Flywheel reinforcement cost (estimation) [100 million]	4.32		
SC+Flywheel installation cost [100 million]	103.368	91.32	
Average capex [million/MVA]	41.28	36.528	

따라서, 동기조상기의 신규 설치 및 전환에 따른 비용은 사업 자체의 특수성과 국가마다 기초작업, 토목공사, 케이블 공사에 드는 비용의 변동성과 공급 용량, 교환 비율에 따라 다른 시장 조건의 변동성으로 공사비가 달라지며, 이에 따라 최종 사업비가 결정됨을 확인하였다.

결론적으로 공사비를 제외한 동기조상기 신규 설치 및 전환비용에 대해 나타낸 표 4를 보았을 때, 100[MVA]를 기준으로 관성을 보강하기 위한 동기조상기의 신규설치와 전환을 비용을 비교

VI. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 국내 전력계통 내 관성확보를 위한 동기조상기 설치를 위한 경제성 분석을 위한 기초 연구를 진행하였다. 이를 위하여 우선 해외의 다양한 동기조상기 설치 및 전환 사례에 대하여 검토하였다. 해당 사례의 설치 시스템의 구성에 따른 평균 사업비를 물가상승률을 고려하여 비교하였다. 아울러, 동기조상기의 신규설치 및 전환에 대한 단위 비용을 산정하여 해외의 전환 및 설치 사례와 비교하여 비용이 11.5%가 절감이 가능한 것으로 분석하였다. 이를 통하여 국내 전력계통 내 관성확보를 위한 동기조상기 설치를 위한 편익 분석을 위한 기초를 마련하였다.

본 논문은 동기조상기 설치를 위한 경제성 분석을 위한 기초 검토를 하였다는 점에 의의를 찾을 수 있다. 그러나 편익 분석을 위한 추가적인 경제성 검토에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Y.-G. Sun, J. Lee, S.-H. Kim, S. Kim, H.-J. Lee, and J.-Y. Kim, "Prediction Technique of Energy Consumption based on Reinforcement Learning in Microgrids", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC), Vol. 21, No. 3, pp. 175-181, Jun. 2021. <https://doi.org/10.7236/IIBC.2021.21.3.175>.
- [2] H. T. Nguyen, G. Yang, A. H. Nielsen, and P. H. Jensen, "Combination of Synchronous Condenser and Synthetic Inertia for Frequency Stability Enhancement in Low-Inertia Systems," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 10, No. 3, pp. 997-1005, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2856938>.
- [3] Y. Yoon, "Configuration of Fuel Cell Power Generation System through Power Conversion Device Design", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC), Vol. 21, No. 6, pp. 129-134, Dec. 2021. <https://doi.org/10.7236/IIBC.2021.21.6.129>.
- [4] Stephen J. Chapman, "ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS", McGraw Hill, Vol. 4, Jun. 2004.
- [5] J. Stein, "Turbine-Generator Topics for Power Plant Engineers-Converting a Synchronous Generator for Operation as a Synchronous Condenser", electric power research institute(EPRI), pp. 43-84, Mar. 2014.

- [6] L. Gandini, "Ansaldo Energia and ABB win an order from Terna worth over 70 million euros to improve the quality of the electric power system in Italy", Ansaldo Energia, Feb. 2020.
- [7] S. Nolan, D. Corcoran, and Dusko Nedic, "Mitigation of the technical scarcities associated with high levels of renewables on the european power system", EirGrid, pp. 40, Jun. 2021.
- [8] Australian Energy Regulator(AER), "Final Decision ElectraNet Contingent Project- Main Grid System Strength", Electranet, pp. 12-13, Aug. 2019.
- [9] Australian Energy Market Operator(AEMO), "Main Grid System Strength Project - Contingency Project Application", ElectraNet, Jun. 2019.
- [10] Helen Wright, "Elering will build three synchronous condenser stations in order to connect to the grid of Continental Europe", Eleing, Dec. 2020.
- [11] A. Sauhats, A. Utans, and Jurijs Silinevics, "Enhancing Power System Frequency with a Novel Load Shedding Method Including Monitoring of Synchronous Condensers' Power Injections", Energies, Mar. 2021. <https://doi.org/10.3390/en14051490>.
- [12] J. West, "Phoenix - International Review", SP Energy Networks, Oct. 2019.
- [13] D. Steven and M. Allan, "Feasibility Study of HTGs Units 1&2 Conversion to Synchronous Condenser-An Evaluation Of Run Up Options For Generators", SNC-Lavalin Inc, pp. 13-51, Feb. 2011.
- [14] K. R. Pullen, "The Status and Future of Flywheel Energy Storage", Joule, Vol. 3, No. 6, pp. 1394-1399, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.04.006>.

저자소개

전혜련 (Hye-Ryeon Jeon)



2022년 2월 : 청주대학교
 융합전자공학부
 전기제어전공(공학사)
 2022년 3월 ~ 현재 : 청주대학교
 전자공학과 석사과정
 관심분야 : 전력시스템

최동희 (DongHee CHOI)



2012년 2월 : 연세대학교
 전기전자공학부(공학사)
 2017년 2월 : 연세대학교
 전기전자공학과(공학박사)
 2019년 3월 ~ 현재 : 청주대학교
 전기제어공학과 조교수
 관심분야 : 전력시스템, 스마트그리드

백승묵 (Seung-Mook Beak)

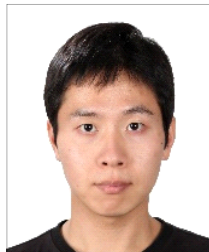


2006년 : 연세대학교
 기계전자공학부(공학사)
 2007년 : 연세대학교
 전기전자공학부(공학석사)
 2010년 : 동대학원
 전기전자공학과(공학박사)
 2009년 ~ 2012년 : 한국전력공사

전력연구원 연구원

2012년 ~ 현재 : 공주대학교 전기공학전공 교수
 관심분야 : 전력시스템, 전력전자, 스마트그리드

이수형 (Soo-Hyoung Lee)



2008년 : 연세대학교
 전기전자공학부(공학사)
 2012년 : 동대학원
 전기전자공학과(공학박사)
 2012년~2014년 : 미국 조지아
 공과대학교 박사후 연구원
 2014년 ~ 2018년 : 한국전기연구원

선임연구원

2018년 ~ 현재 : 목포대학교 전기제어공학과 부교수
 관심분야 : 전력시스템, 전력전자, 고전압어플리케이션

이 희 진 (Hee-Jin Lee)



스마트그리드

2008년 2월 : 연세대학교

전기전자공학부(공학사)

2013년 2월 : 연세대학교

전기전자공학과(공학박사)

2015년 2월 ~ 현재 :

금오공과대학교 전자공학부 교수

관심분야 : 전력시스템, 전력전자,