

초전도발전기의 도입효과에 관한 연구

백승균, 심기덕, 권운식, 손명환, 이언용, 권영길, 박희주*, 김영춘*, 조창호*
한국전기연구원 초전도응용연구그룹, 두산중공업 기술연구원*

A Study on the Introduction Effect of Superconducting Generators

S.K. Baik, K.D. Shim, W.S. Kwon, M.H. Sohn, E.Y. Lee, Y.K. Kwon,
H.J. Park*, Y.C. Kim*, C.H. Cho*
KERI Applied Superconductivity Research Group
Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd. R&D Center

skbaik@keri.re.kr

Abstract - The superconducting generator and motor have many advantages over the conventional machines. The better characteristics originates from the higher magnetic field density by way of superconducting field coil which conducts the operating current with very large density. The major merits of the superconducting machines can be explained as the smaller size and weight as well as the higher efficiency. The compactness would be very useful for the applications such as ship propulsion motors and the higher efficiency is expected to play a good role in saving the electricity generation cost for the generators used in power plants. In spite of these advantages the main reason for the lazy commercialization is known as the expensiveness of the superconductors and the cryogenic systems. In this paper focusing on the superconducting generator, we will consider and estimate the economic effectiveness when the machines permeate into the actual AC generator market in Korea gradually.

1. 서 론

한국 전력공사에서는 1999년 향후 15년간의 발전량 계획을 수립하였다. 이 계획의 자세한 내용을 분석해 보면, 2000에서 2005년으로 발전량은 250,627 [GWh]에서 329,412[GWh]으로 31.44% 증가하고, 2006년에서 2010년으로 329,412 [GWh]에서 384,173[GWh]으로 16.62 % 증가하며 2010년에서 2015년으로 384,173 [GWh]에서 426,769[GWh]으로 11.09% 증가한다[1].

Table 1. Generation Plan

연도	발전량[GWh]
2000	250,627
2005	329,412
2010	384,173
2015	426,769

(한국전력공사 예측 자료 '99)

우리가 수행할 분석을 위해서는 각 연도의 전력량이 필요하며, 위의 계획안에서 제시된 연도 사이의 연도에서의 발전량은 제시된 발전량들을 시작점과 끝점으로 하여 선형적으로 증가한다고 본다. 발전량의 증가율은 31.44% → 16.62% → 11.09% 으로 감소하고, 2016 → 2020년의 증가율은 11.09%보다 더 작아질 것이다. 이 값을 예측하기위해서 다음과 같은 방법을 사용하였다.

2000 → 2005년에서 2006 → 2010년의 증가율은 각각 31.44% 에서 16.62% 으로 감소했으며 그 차이는 14.82% 이다. 즉 14.82% 감소한 것이다. 마찬가지로 2006 → 2010년에서 2011 → 2015년의 증가율은 16.62% 에서 11.09% 으로 감소했으며 그 차이는 5.53% 이다. 즉 5.53% 감소한 것이다. 즉, 증가율의 감소량이 14.82% 에서 5.53% 으로 62.69% 감소하였으므로, 2011 → 2015년에서 2016 → 2020년으로 증가율의 감소량은 5.53% 의 62.69% 감소량인 2.06% 가 될 것이다. 따라서 2016 → 2020년의 증가율은 2011 → 2015년의 증가율 11.09%에서 2.06% 제외한 9.03% 가 될 것이다. 그러므로 2020년의 발전량은 식 (1) 와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{2020년 발전량} &= \text{2015년 발전량} + \\
 &\quad \text{2015년 발전량} \times 9.03 \div 100 \\
 &= 465,306[\text{GWh}] \quad (1)
 \end{aligned}$$

이러한 방법으로 예측한 각 연도의 발전량을 Fig. 1 와 같이 나타낸다.

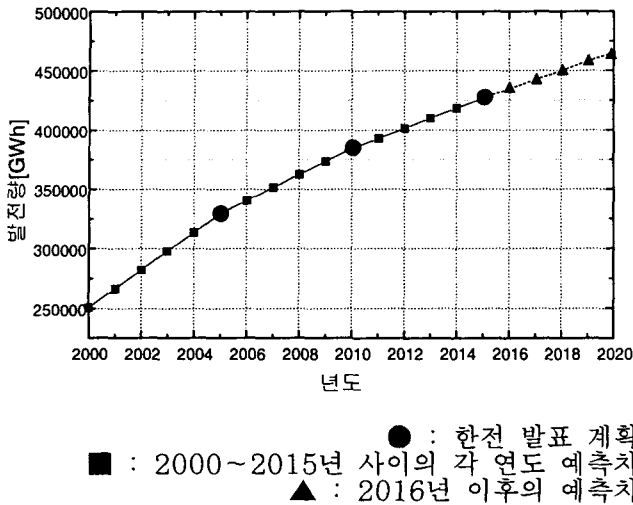


Fig. 1. Domestic Generation Plan

2. 본 론

2.1 효율향상을 통한 비용 절약 효과 예측

기존 발전기와 비교하여 초전도 발전기가 1% 효율이 높다고 가정하고 2009년부터 점차적으로 시장에 투입된다고 보고 이에 따른 전력량의 절약 효과를 분석해 본다. 계산시 고려된 사항들을 아래에 정리하고 그 결과를 Table 2 에 정리한다.

- 몇 가지 사실 및 가정
 - 2009년 시장 진출, 2014년 10% 점유, 2020년 59% 점유 (DOE의 2002년 예측 참조(2))
 - 전기요금 : 75원/kWh (98년 불변가격)
- 연간 target 시장
 - 당해 년도 신규 발전기 수요율(%) = 당해 년도 신규 발전량 차지 비율(%)
 - 교체율 연 2% (수명을 평균 50년 가정)
 - 위 두 수치를 합산하면 연간 고온 초전도 발전기의 target 시장 비율(%)
- 당해 년도 신규 절약량 계산식
 - (당해 년도 발전량) × (Target 시장 비율) × (시장점유율) × (효율향상 1%)
 - 당해 년도 절약량은 당해 년도까지 신규 절약량을 누적하여 구함
- 당해 년도 절약 금액 계산식
 - (당해 년도 절약량) × 75원/kWh

Table 2. Cost savings through the introduction of superconducting generators

연도	발전량 (GWh) ①	시장 점유율 (%)	연간 절약량 (GWh) ②	신규 절약액 (억원)	연간 절약액 (억원)
2008	362,269	0	0.00	0.00	0.00
2009	373,221	1	1.84	1.38	1.38
2010	384,173	2	5.57	2.80	4.18
2011	392,692	3	10.48	3.68	7.86
2012	401,211	5	18.75	6.20	14.06
2013	409,731	7	30.45	8.78	22.84
2014	418,250	10	47.34	12.66	35.50
2015	426,769	15	72.92	19.19	54.69
2016	434,476	22	108.99	27.05	81.74
2017	442,184	31	160.30	38.48	120.22
2018	449,891	40	227.12	50.12	170.34
2019	457,599	50	311.42	63.22	233.56
2020	465,306	59	411.80	75.29	308.85

2.2 CO² 배출량 저감을 통한 경제적 효과

초전도 전력기기가 전력시스템에 도입될 경우 시스템의 효율향상을 도모할 수 있다. 전력 시스템의 효율향상(손실 감소)분 만큼 전력생산을 하지 않아도 됨으로, 전력생산시 소모되는 화석연료의 사용량을 줄여 온실가스 특히, CO²의 배출을 억제할 수 있다. 기후변화 협약 체결의 결과가 가까운 미래에 온실가스 저감은 각 국가가 해결해야 할 현실적 문제로 부각될 것이다. 현재, 전 세계적으로 이에 대한 대비를 하고 있으며, 미국 일본 등의 선진국에서는 일찍이 고온 초전도 전력기기 기술의 이 분야 실효성을 인식하고 연구 개발에 막차를 가하고 있다. 여기에서는 국내 전력 시스템에 초전도 발전기가 도입되었을 때 발생할 CO² 저감효과 및 이에 의한 경제적 파급효과를 분석하였다.

한국전력에서 향후 전력 생산 분야의 CO² 배출량을 2010년까지 약 4000만 c-t에서 배출량을 억제할 계획을 세우고 있다. 일반적으로 전력생산이 증가함에 따라 CO² 배출량도 따라서 증가한다. 한국전력은 온실가스 배출이 적은 연료의 비율을 늘리는 방법으로 아래의 목표량을 달성할 계획인 것으로 보인다. 그러나 아직 풍력, 태양열 등의 청정에너지는 그 기술의 한계로 상용화 단계에 이르지 못하고 있으며, 수력발전 또한 확장에 한계가 있다. 더욱이, 전 세계적으로 원자력 발전의 비중을 줄여나가는 추세이므로, 아래의 계획이 달성될 수 있을 지는 미지수이다. 그러나 한전의 향후 예측은 우리가 수행할 예측의 최소값으로서의 의미는 가지고 있는 듯하다. 한전에서는 2010년까지의 배출량만을 예측하였으며, 2020년까지의 예측은 한전의 예측을 기준으로 2010년의 연료사용 비율이 그 이후에도 유지된다는 가정 하에 수행하였다. 결과, 2015년에는 전력생산을 통해 연간 4500만 c-t, 그리고 2020년에는 4900만 c-t의 CO²가 배출될 것으

로 예측된다.

만약 초전도 발전기의 도입을 통해 발전 효율을 1% 증가시킬 수 있다면, 전력 생산량을 1% 줄여도 되고, 따라서, CO² 배출량도 1% 감소하게 된다. 이와 같은 논리로 초전도 발전기 도입을 통한 전력량 절약 및 CO² 감축량을 계산하였다. 초전도 발전기가 도입될 경우, 각 연도별로 절약할 수 있는 전력량은 Table 2의 자료를 이용한다.

Table 3. CO₂ emission and reduction cost savings through the introduction of superconducting generator

연도	CO ² 배출량 (천 c-t)③	감축 비율 (②/①) (%)④	CO ² 배출 저감량 (천 c-t) ③×④	연간 감축비용 절약액 (억원)
2008	38,287	0.00	0.00	0.00
2009	39,445	0.0005	0.19	1.01
2010	40,602	0.0014	0.59	3.13
2011	41,502	0.0027	1.11	5.88
2012	42,403	0.0047	1.99	10.55
2013	43,303	0.0074	3.20	16.96
2014	44,203	0.0113	4.99	26.45
2015	45,104	0.0171	7.71	40.86
2016	45,918	0.0251	11.53	61.11
2017	46,733	0.0363	16.96	89.89
2018	47,548	0.0505	24.01	127.25
2019	48,362	0.0681	32.93	174.53
2020	49,177	0.0885	43.52	230.66

위의 전력량 절약 효과를 바탕으로 CO² 배출 저감효과를 분석하였다. 결과, 2010년에는 연간 590 c-t, 2015년에는 4,990 c-t, 그리고 2020년에는 약 43,520 c-t의 CO² 배출을 감소시킬 것으로 판단된다. '에너지 경제 연구원'은 2020년, 1 c-t의 CO² 배출량 감소에 약 53만 원 정도의 비용이 소요될 것으로 예측하였다. 이를 근거로 초전도 발전기 도입을 통한 CO² 감축 비용 절약액을 추산하였다. 결과 2015년에는 연간 약 41억원, 2020년에는 연간 231억원의 CO² 감축비용 절약효과가 발생할 것으로 예측된다. 따라서 이 표에 의한 2020년까지의 CO² 감축비용 절약액은 788억원에 이른다.

2.3 초전도발전기 국내시장 예측

초전도 발전기가 우선적으로 투입될 것으로 보이는 '교류발전기 부문'에 대한 시장규모를 예측하였다. 단품 교류 발전기에 대한 예측일 뿐, 발전 plant set, 발전기 부분품 등은 고려하지 않았다. Table 4은 1996, 1997년의 교류발전기의 국내 시장규모를 나타내는 표이다. 신규 전력 생산량(발전량)에 비례하여 전체 교류발전기 시장 규모도 성장할 것으로 가정하였다. 1996년에 국내에서 생산된 전력량은 205,500 [GWh] 이고 1997년에는 224,400[GWh] 이었으며, 이 기간의 신규 발전량은 두 해의 차에 해당하는

18,900[GWh]가 된다. 신규 발전량이 해마다 감소하므로 발전기 국내 시장 규모는 시간이 갈수록 감소한다고 할 수 있다.

Table 4. Domestic market of AC generators

연도	생산 실적 (억원)	수출액 (천\$)	수입액 (천\$)	수입액- 수출액 (억원)	국내시장 (생산-수출 +수입) (억원)
1996	421	5,158	127,503	891	1,312
1997	509	6,793	90,724	611	1,120

1\$당 728원 기준(1996,1997년 평균환율)
'전기공업통계', 전기공업진흥회, 2000

Table 5. Domestic market prediction of superconducting generators

연도	신규 발전량 (GWh)	교류 발전기 시장 (억원)	target 시장 (억원)	초전도 시장 점유율 (%)	초전도 시장 (억원)⑤
2008	10,952	649	325	0.00	0.00
2009	10,952	649	325	1.00	3.25
2010	10,952	649	325	2.00	6.50
2011	8,519	505	253	3.00	7.59
2012	8,519	505	253	5.00	12.65
2013	8,519	505	253	7.00	17.71
2014	8,519	505	253	10.00	25.30
2015	8,519	505	253	15.00	37.95
2016	7,707	457	229	22.00	50.38
2017	7,707	457	229	31.00	70.99
2018	7,707	457	229	40.00	91.60
2019	7,707	457	229	50.00	114.50
2020	7,707	457	229	59.00	135.11

이러한 방식으로 국내 교류 발전기시장 규모를 예측하였다. 예를 들어, 2009년의 교류 발전기시장은 2009년의 신규 발전량인 10,952 [GWh]에 1997년의 신규 발전량인 18,900 [GWh]을 나눈 후 1997년의 국내시장 규모인 1,120 억원을 곱하여 649 억원이 된다. 또한 고온 초전도 교류발전기가 진출할 수 있는 시장은 전체 교류 발전기시장의 약 50%를 차지하는 것으로 보았다(target market). 그리고 동급의 기존발전기와 고온초전도 발전기가 같은 가격대를 형성한다고 가정하였다. Table 5에 예측된 국내 시장 규모를 정리한다.

2.4 초전도발전기 도입 효과 분석

앞의 Table 5은 고온 초전도 발전기가 동일 용량의 기존 발전기와 가격이 동일하다고 가정하는 것이며, 이 경우에 2020년 까지 1,055억원의 전기를 절약할 수 있고 앞의 CO² 감축비용 절약액 788억원을 더하면 초전도 발전기의 설치로 인해 1,843억원의 이득을 얻게 된다. 고온 초전도 발전기가 동일 용량의 기존 발전기의 가격의 2배라고 가정하면, Table 6에서 볼 수 있듯이 2020년까지의 고온 초전도 발전기의 총 판매가

격(⑥)은 573억원(⑤)의 2배가 되고 573억원을 더 투자한 결과가 된다. 이 경우라도 총 이익인 1,843억원에서 더 투자한 값을 빼도 2020년까지 1,270억원의 이익을 볼 수 있다. 마찬가지로 기존 발전기의 가격의 4배의 경우에도 2020년까지 기존 발전기를 투입한 경우보다 1721억원을 더 투자한 결과가 되지만, CO² 감축비용 절약액까지 포함한 총 이익인 1,843억원이 더 많으므로 122억원의 이익을 얻을 수 있다.

Table 6. Superconducting generator market prediction according to the prices

연도	초전도시장 (기존 발전기 2배가격) (억원) ⑤×2	초전도시장 (기존 발전기 3배가격) (억원) ⑤×3	초전도시장 (기존 발전기 4배가격) (억원) ⑤×4	연간 전기 절약 (억원)
2008	0.00	0.00	0.00	0.00
2009	6.50	9.75	13.00	1.38
2010	13.00	19.50	26.00	4.18
2011	15.18	22.77	30.36	7.86
2012	25.30	37.95	50.60	14.06
2013	35.42	53.13	70.84	22.84
2014	50.60	75.90	101.20	35.50
2015	75.90	113.85	151.80	54.69
2016	100.76	125.95	201.52	81.74
2017	141.98	151.14	283.96	120.22
2018	183.20	274.80	366.40	170.34
2019	229.00	343.50	458.00	233.56
2020	270.22	405.33	540.44	308.85
합계	⑥1,147	⑦1,634	⑧2,294	1,055

지금까지는 2020년까지 초전도 발전기를 투입해서 얻어지는 이익을 살펴보았으나, 실제로 발전기의 수명은 앞에서 가정한 바와 같이 50년 정도 되므로, 2020년까지 투입된 초전도 발전기에 의해서 향후 얻어질 수 있는 총 전기절약 이익은 Table 7 와 같이 신규 절약금액의 합인 50배인 15,442억원이 된다. 마찬가지로 방법으로 50년 운전에 의한 CO² 감축비용의 절약액은 11,583억원이 된다. 이들을 합하면 투입된 고온 초전도 발전기에 의해 그 수명이 다할 때까지 얻어지는 이익의 총액이 되며 27,026억원이 된다. 이렇게 계산된 이익의 총액을 이용하여 기존 발전기의 몇 배의 가격이 되어도 경제성이 있는지를 식 (2)을 이용하여 계산한다. 이 식을 만족하는 해는 $x < 48.16$ 이 되며, 즉 기존 발전기 가격의 48 배가 되어도 경제적인 이익이 있다는 결론이 된다.

$$573\text{억원} \times x - 573\text{억원} < 27,026\text{억원} \quad (2)$$

Table 7. Saving effect via superconducting generator during 50 year operation

초전도 투입 연도	신규 절약금액 (억원) ⑨	50년운전후 총절약금액 (억원) ⑨×50	신규CO ² 감축비용 절약액 (억원)⑩	50년운전후 CO ² 감축비용 총절약액 (억원)⑩×50
2008	0.00	0.00	0.00	0.00
2009	1.38	69.00	1.01	50.5
2010	2.80	140.00	2.12	106.00
2011	3.68	184.00	3.76	188.00
2012	6.20	310.00	4.67	233.50
2013	8.78	439.00	6.41	320.50
2014	12.66	633.00	9.49	474.50
2015	19.19	959.50	14.41	720.50
2016	27.05	1352.50	20.25	1012.50
2017	38.48	1924.00	28.78	1439.00
2018	50.12	2506.00	37.36	1868.00
2019	63.22	3161.00	47.28	2364.00
2020	75.29	3764.50	56.13	2806.50
합계	308.85	15,442.5	231.67	11,583.5

3. 결 론

2001년 12월 현재 국내에서 발전기 설비용량에 비해서 발전기의 수가 가장 많은 소수력 발전의 경우에, 발전기 한 대당 평균 설비용량은 0.48[MW] 이다. 두 번째로 설비용량에 대한 발전기의 수가 많은 경유 발전의 경우, 발전기 한 대당 평균 설비용량은 5.94[MW] 이다. 앞의 계산 결과에 따르면 초전도 발전기가 기존 발전기 가격의 48배가 되어도 50년 운전시 경제성이 있는 것으로 계산되었으므로 이 정도 용량에서도 경제성이 있을 것으로 사료된다. 따라서 국내에 설치된 발전소에 사용되는 발전기는 모두 초전도 발전기의 target 시장이 될 수 있을 것으로 볼 수 있다. 또한, 기존 발전기에 대한 초전도 발전기 가격의 비는 그 용량이 증가할수록 더 작아지므로, 화력이나 원자력 발전에 사용되는 훨씬 큰 용량에 적용한다면 그 경제적인 효과는 훨씬 더 클 것으로 예측할 수 있다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, "한국전력통계", 제70호, 2001.
- [2] L.R. Lawrence et. al, "HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY: THE PRODUCTS AND THEIR BENEFITS", December 31, 2002.