

DC 전원 공급율에 따른 신재생에너지 계통 연계의 경제성 평가

김성열*, 신강욱**, 홍성택**, 김진오*
한양대*, 한국수자원공사**

The Economic Evaluation of Renewable Energy Penetration According to the Ratio of DC Power Supply

Sung-Yul Kim*, Gang-Wook Shin**, Sung-Taek Hong**, Jin-O Kim*
Hanyang University*, K-water**

Abstract - IT 산업의 발전에 따른 디지털 부하 증가는 기존 교류 배전 방식에서 DC 전원 공급에 따른 전력 변환 손실을 야기시킨다. 또한, 향후 신재생에너지를 통한 발전원 및 전기자동차의 계통 유입 확대에 의해 AC/DC 전력 변환에 따른 손실은 더욱 증대될 것으로 예상된다. 이에 본 논문에서는 DC 전원 공급율에 따른 전력 공급량 산정 기법을 제안한다. 또한, 탄소배출 비용을 함께 고려하여 DC 전원 공급율에 따른 신재생에너지 계통 연계의 경제적 타당성을 분석한다.

1. 서 론

기후변화 협약 및 신재생에너지 의무할당제 도입으로 인해 신재생에너지를 통한 발전량이 증가하고 있다. 신재생에너지의 경우, 기존의 교류 배전방식에서는 직류로 변환하는 과정을 거친 후 다시 교류로 공급되기 때문에 전력 변환 손실이 발생하게 된다 [1]. 또한, 디지털 부하의 증가와 전기자동차의 개발 및 보급 확대에 의해 DC 부하율이 점진적으로 증가하면서, 이에 따른 전력 변환 손실이 더욱 심각해질 것으로 예상된다 [2].

강제적 성격을 띠는 신재생에너지 의무할당제의 도입은 신재생에너지를 통한 발전을 향상에 기여하고 있으나, 현재 신재생에너지의 발전 단계는 계통을 통한 전력 구매 비용에 비해 경제성이 떨어지므로, 관련 기술 추이에 따라 경제성 있는 신재생에너지 연계 용량을 산정하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서, 본 논문에서는 DC 부하율에 따라 신재생에너지를 통한 직접적인 DC 전원 공급 체계를 갖추었을 때, 전력 변환 과정에서 발생하는 손실 저감량을 산정한다. 또한, 계통을 통한 전력 구입 단계, 신재생에너지를 통한 발전 비용 및 탄소배출 비용 추이를 고려하여 전체 부하에 대한 전력 공급 시, 년도별 DC 전원 공급율에 따른 경제적 타당성에 대해 분석하도록 한다.

2. DC 전원율에 따른 전력 공급량

AC에 비해 월등한 역률로 우수한 전력품질유지가 가능한 DC 전원 공급 방식은 기존의 DC 부하를 AC로 공급할 때 발생하는 전력 변환 장치에 의한 변환 손실을 경감시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 특히, DC 부하가 주를 이루고 있는 인터넷 데이터 센터(IDC)에서는 DC 전원 공급율이 증가하고 있는 추세이다 [3]. 또한, 신재생에너지의 필요성이 증대되면서 직류 출력을 갖는 소규모 분산전원이 확대 보급되고 있으며 이에 따라 세계 각국에서 저전압 DC 배전의 타당성과 경제성을 검토하고 있는 단계이다. DC 설비 부하량을 기준으로 DC 전원율에 따른 전력 공급량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{i) } P^{\text{DC}} &= 0 \\ P^{\text{AC}} &= L^{\text{AC}} + L^{\text{DC}} \\ (\because L^{\text{DC}} &= L_0^{\text{DC}} / e_{\text{AC/DC}}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ii) } P^{\text{DC}} < L_0^{\text{DC}} \\ P^{\text{AC}} &= (L^{\text{DC}} \cdot e_{\text{AC/DC}} - P^{\text{DC}}) / e_{\text{AC/DC}} + L^{\text{AC}} \\ P &= P^{\text{DC}} + (L^{\text{DC}} \cdot e_{\text{AC/DC}} - P^{\text{DC}}) / e_{\text{AC/DC}} + L^{\text{AC}} \\ &= (L^{\text{AC}} + L^{\text{DC}}) / (1 - \eta_{\text{DC}} + \eta_{\text{DC}} / e_{\text{AC/DC}}) \\ (\because P^{\text{DC}} &= \eta_{\text{DC}} \cdot P) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{iii) } P^{\text{DC}} = L_0^{\text{DC}} \\ P^{\text{AC}} &= L^{\text{AC}} \\ P &= L^{\text{AC}} + L_0^{\text{DC}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$P = L^{\text{AC}} + L_0^{\text{DC}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{iv) } P^{\text{DC}} > L_0^{\text{DC}} \\ P^{\text{AC}} &= (L^{\text{DC}} \cdot e_{\text{AC/DC}} - P^{\text{DC}}) \cdot e_{\text{DC/AC}} + L^{\text{AC}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P &= P^{\text{DC}} + (L^{\text{DC}} \cdot e_{\text{AC/DC}} - P^{\text{DC}}) \cdot e_{\text{DC/AC}} + L^{\text{AC}} \\ &= (L^{\text{AC}} + L^{\text{DC}} \cdot e_{\text{AC/DC}} \cdot e_{\text{DC/AC}}) / (1 - \eta_{\text{DC}} + \eta_{\text{DC}} \cdot e_{\text{DC/AC}}) \end{aligned} \quad (7)$$

P : 전체 전력 공급량 [kWh]
P^{AC} : AC 전력 공급량 [kWh]
P^{DC} : DC 전력 공급량 [kWh]
L^{AC} : AC 부하량 [kWh]
L^{DC} : DC 부하량 [kWh]
L_0^{DC} : DC 설비 부하량 [kWh]
$e_{\text{AC/DC}}$: AC/DC 전력 변환 효율
$e_{\text{DC/AC}}$: DC/AC 전력 변환 효율
η_{DC} : DC 전원 공급율

이 때, DC 설비 부하량은 DC/AC 전력 변환 과정을 통해 부하에 전력을 공급하기 이전의 부하량, 즉, 변환 효율 손실을 고려하지 않은 부하량을 나타낸다.

3. DC 전원 공급율에 따른 신재생에너지 연계의 경제성 평가

최근 신재생에너지 의무할당제 및 탄소배출 규제와 같은 제약에 따라, 신재생에너지가 확대 보급되고 있다. 그러나 현 시점에서 신재생에너지의 무조건적인 보급 확대 보다는 경제적 실효성을 평가해보고, 단계적인 보급 계획을 수립할 필요가 있다.

3.1 Grid Parity에 따른 신재생에너지의 경제성

Grid Parity는 신재생에너지원에 의해 생산된 전력의 소매 가격이 coal-based 발전의 소매 가격과 같아지는 수준을 지칭하는 말이다. 여기서, 소매 가격이란 순수하게 전력 생산을 위한 비용과 배분 비용, 세금 등을 포함하는 개념이다.

신재생에너지원을 통한 발전은 점차 경쟁력을 확보하고 있고, 특히 태양광 발전의 경우, 2015년에서 2020년 사이에 Grid Parity가 존재할 것으로 예상되고 있다.

다음 식은 각각 n년 후에 전력 구매에 따른 비용, 신재생에너지를 통한 DC 발전 비용 및 전체 부하에 대한 전력 공급을 위해 발생하는 총 비용을 나타낸다.

$$C_n^{\text{market}}(P^{\text{AC}}) = (1 + \gamma^{\text{market}})^n \cdot C^{\text{market}} \cdot P^{\text{AC}} \quad (10)$$

$$C_n^{\text{RES}}(P^{\text{DC}}) = \sum_{i \in \text{RES}} (1 - \gamma_i^{\text{RES}})^n \cdot C_i^{\text{RES}} \cdot P_i^{\text{DC}} \quad (11)$$

$$C_n(P, \eta_{\text{DC}}) = C_n^{\text{market}}((1 - \eta_{\text{DC}}) \cdot P) + C_n^{\text{RES}}(\eta_{\text{DC}} \cdot P) \quad (12)$$

$$\text{s.t. } P^{\text{DC}} = \sum_{i \in \text{RES}} P_i^{\text{DC}}$$

$$P = P^{\text{AC}} + P^{\text{DC}}$$

$C_n(P^{\text{AC}}, P^{\text{DC}})$: n년 후, 전력공급에 따른 총 비용
$C_n^{\text{market}}(P^{\text{AC}})$: n년 후, 총 전력구매 비용 [₩]
$C_n^{\text{RES}}(P^{\text{DC}})$: n년 후, 신재생에너지 총 전력생산 비용 [₩]
C^{market} : 현 전력구매 가격 [₩/kWh]
C_i^{RES} : i번째 신재생에너지의 현 발전 비용 [₩/kWh]
P_i^{DC} : i번째 신재생에너지의 발전량 [kWh]
γ^{market} : 전력시장 가격증가율
γ_i^{RES} : i번째 신재생에너지 발전 비용 감소율

3.2 신재생에너지 발전량에 따른 탄소배출 비용 이익

화석연료를 통해 발전을 할 경우, 탄소배출이 불가피하다. 이는 국제적 환경 패러다임에 따라 탄소배출 비용으로 환산되어, 발전기 효율 및 비용 함수와 더불어 발전기의 한계 비용을 결정하는 주요한 요인으로 작용한다. 다음 식은 탄소배출 비용 증가율을 고려하여 n년 후, 발전량에 따른 탄소배출 비용을 나타낸다.

$$C_n^{CO_2}(P^{AC}) = \Xi \cdot (1 + \gamma^{CO_2})^n \cdot C^{CO_2} \cdot P^{AC} \quad (13)$$

$C_n^{CO_2}(P^{AC})$: n년 후, 외부 계통을 통한 전력 공급시 총 탄소배출 비용
 Ξ : 국내 단위 전력 생산량 대비 탄소배출 계수 [CO₂-kg/kWh]
 γ^{CO_2} : 탄소배출 비용 증가율
 C^{CO_2} : 현 탄소배출 비용 [₩/CO₂-kg]

신재생에너지의 경우, 발전에 따른 탄소배출량이 미비하므로, 탄소배출 계수를 0으로 가정할 수 있다. 또한, 탄소배출 저감량은 배출권 거래제를 통해 실거래가 가능하다. 따라서 신재생에너지를 통한 발전량만큼을 계통에서 생산할 경우에 발생하는 탄소배출 비용을 신재생에너지를 통한 발전 이익으로 환산할 수 있고, 이를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_n^{RES}(P^{DC}) = \sum_{i \in \text{RES}} (1 - \gamma_i^{RES})^n \cdot C_i^{RES} \cdot P_i^{DC} - C_n^{CO_2}(P^{DC}) \quad (14)$$

4. 사례 연구

신재생에너지가 연계된 배전계통에서 DC 전원 공급율에 따른 신재생에너지의 경제성을 평가하기 위해, 공주 정수처리장을 대상으로 사례연구를 모의하였다. 공주 정수처리 시스템을 부하 말단의 전원 형태에 따라 구분하면 다음 표와 같고, 이 때 역률은 0.92로 가정하였다.

〈표 1〉 공주 정수처리 시스템 부하

	AC 부하	DC 부하	전체 부하
피상전력 [kVA]	1135.60	330.76	1466.36
유효전력 [kW]	1044.75	330.76	1375.51

위의 표를 근거로, AC 부하율과 DC 부하율을 각각 0.77, 0.23로 설정할 수 있다. 평균 전력 사용량은 공주 정수처리장의 2009년 10~12월까지의 평균 전력 사용량인 130,191 kWh/월, 전력 변환 효율은 0.9로 가정하였다. 또한, 모의 계통은 태양광과 같은 신재생에너지와 배터리를 연계하여 시스템 내에 DC 전원 공급이 가능하다고 가정하였다.

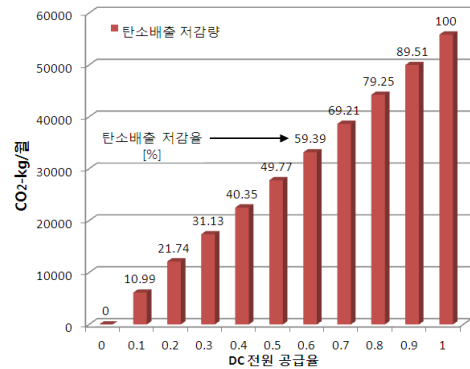
식 (1)~(7)을 이용하여, DC 전원 공급율에 따른 전원별 공급량과 DC 전원 공급율이 0일 때를 기준으로 한 전력 저감량을 표 3과 같이 나타낼 수 있다.

〈표 2〉 DC 전원 공급율에 따른 전원별 공급량 및 저감량

η_{DC}	총 공급 [kWh/월]	AC [kWh/월]	DC [kWh/월]	저감량 [kWh/월]	저감율 [%]
0	130,191	130,191	0	0	0
0.1	128,760	115,884	12,876	1,431	1.10
0.2	127,361	101,889	25,472	2,830	2.17
0.22	127,066	98,945	28,121	3,125	2.40
0.3	128,097	89,668	38,429	2,094	1.61
0.4	129,432	77,659	51,773	759	0.58
0.5	130,794	65,397	65,397	-603	-0.46
0.6	132,185	52,874	79,311	-1,994	-1.53
0.7	133,607	40,082	93,525	-3,416	-2.62
0.8	135,059	27,012	108,047	-4,868	-3.74
0.9	136,543	13,654	122,889	-6,352	-4.88
1.0	138,060	0	138,060	-7,869	-6.04

DC 전원 공급율이 1에 가까워질수록 시스템 내부에서 자체적으로 DC 형태의 에너지 생산 비중이 높아지는 상태를 나타낸다. DC 전원 공급량과 DC 설비 부하량이 같아지는 지점에서 전력 저감이 가장 크게 발생하며, 이를 식 (4)를 통해 산출했을 때 DC 전원 공급율은 0.22이다.

신재생에너지를 통한 전력 생산 시 발생하는 탄소배출 이익을 산정하기 위해, 국내 단위 전력 생산량 대비 탄소배출 계수는 0.429 CO₂-kg/kWh로 가정하면, 탄소배출 저감량은 다음 그림과 같이 나타낼 수 있다.



〈그림 1〉 DC 전원 공급율에 따른 탄소배출 저감량

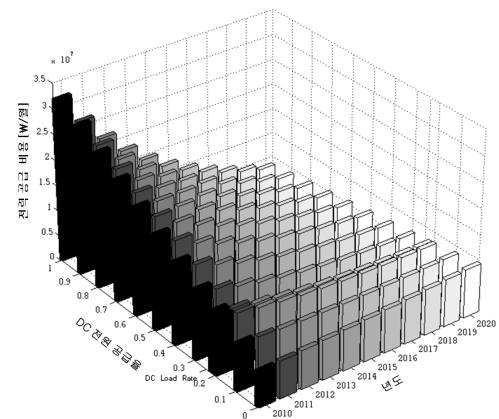
신재생에너지를 통한 전력 생산 시, 탄소배출 계수를 0으로 가정하였으므로 DC 전원 공급율이 증가할수록 기존 전력 공급에 따른 탄소배출량이 단계적으로 저감되는 것을 확인할 수 있다.

n년 후에 전력 구매에 따른 비용, 신재생에너지를 통한 DC 발전 비용 및 전체 부하에 대한 전력 공급을 위해 발생하는 총 비용을 산정하기 위해 현재 전기 요금, 태양광 발전 단가 및 탄소배출 비용에 관한 데이터는 다음과 같다.

〈표 3〉 총 전력 공급 비용 산정을 위한 데이터

구분	비용	증감율 [%]
전력 구매	54.2 [원/kWh]	3
태양광 발전	240 [원/kWh]	17
탄소배출	22.08 [원/CO ₂ -ton]	3

연도별 DC 전원 공급율에 따른 전력 공급 비용은 다음과 같다.



〈그림 2〉 연도별 DC 전원 공급율에 따른 전력 공급 비용

2016년을 기점으로 신재생에너지를 통한 전력 공급이 총 비용 측면에서 이익으로 작용하는 구간이 존재하며, 그 이후부터는 DC 전원 공급율이 높아질수록 비용 이익으로 작용한다. 따라서 본 사례연구 계통의 경우, 2016년에는 DC 전원 공급율을 0.22로 운영하는 것이 최적이며, 그 이후에는 DC 전원 공급율을 증가시킬수록 비용 최적 운영에 근접한다는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

국내·외 환경 규제에 의해 신재생에너지의 계통 유입이 불가피한 시점에서 본 연구는 향후 신재생에너지를 통한 전력 공급의 경제성을 분석하여, 신재생에너지 도입 시점 및 공급율의 합리적이고 전략적인 대책 수립 근거를 제공한다.

〈참고 문헌〉

- [1] 정법진, 목형수, 주재훈, 손성용, "분산전원 연계형 DC배전 기반 주거공간에서의 계통운용효율 고찰", 대한전기학회, 2010 대한전기학회 제41회 하계학술대회, pp.430~432, 2010.7
- [2] 장성규, 허재선, 조성민, 신희상, 김재철, "공동주택의 전기자동차 보급예측에 의한 충전설비 계획에 관한 연구", 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회논문지, 제24권 제10호, pp.114~122, 2010.10
- [3] 손성용, 목형수, 박경석, 홍준희, "교류배전시스템과 직류배전시스템이 적용된 IDC 전력효율 비교연구", 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회논문지, 제22권 제8호, pp.38~44, 2008.8