

DC 전원 공급을에 따른 신재생에너지 계통 연계의 경제성 평가

김성열 <계명대학교 교수>

1. DC 배전

DC 배전은 각 기기에 AC로 전력을 공급해 기기마다 장착한 AC 어댑터 등의 AC/DC 컨버터를 이용하여 DC로 변환하는 기존의 방법에서 탈피하여, 송전 전력을 고효율 AC/DC 컨버터를 사용하여, DC로 일괄 변환한 뒤 각 기기에 공급하는 시스템을 지칭한다. 기존의 AC 배전 방식과 DC 배전 방식의 개괄적인 예를 그림 1에 나타내었다.

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[5]. 또한, 신재생에너지의 필요성이 증대되면서 직류 출력을 갖는 소규모 분산전원이 확대 보급되고 있으며 이에 따라 세계 각국에서 저전압 DC 배전의

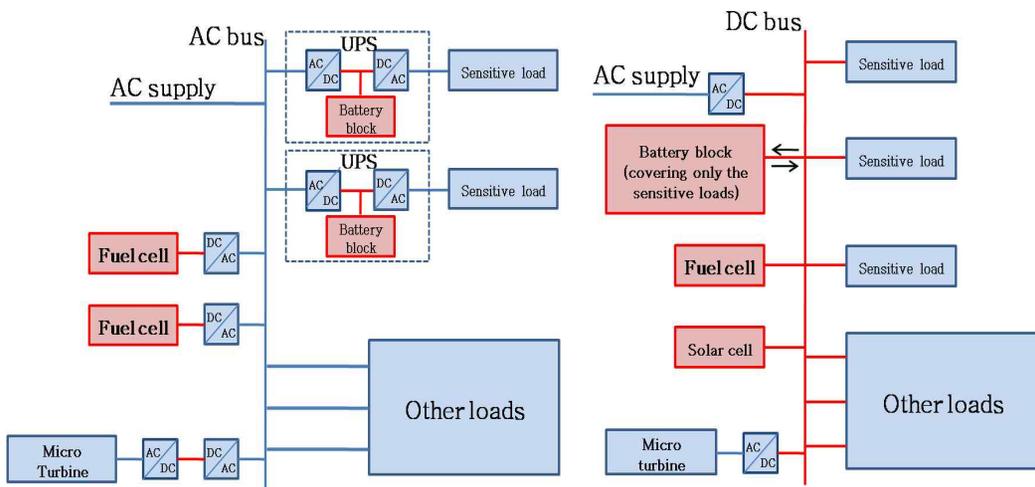


그림 1. AC 배전 방식 vs DC 배전 방식

타당성과 경제성을 검토하고 있는 단계이다. 다음 표는 가정의 전력 변환 과정에서 발생하는 전력 손실을 나타낸다.

표 1. 전력 변환 과정에서 발생하는 손실

(가정: 변환 효율 0.9)

시스템	변환 과정	손실 %
PV	신재생에너지(DC/AC)→AC/DC →DC 부하	19.0
PV + Bat.	신재생에너지(DC/AC)→배터리(AC/DC/AC) →AC/DC→DC 부하	34.4
DC 전원	배전→AC/DC→DC 부하	10.0

DC 설비 부하량을 기준으로 DC 전원을 따른 전력 공급량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

$$\begin{aligned}
 & P = P^{\text{DC}} + (L^{\text{DC}} \cdot e_{\text{AC/DC}} - P^{\text{DC}}) / e_{\text{AC/DC}} + L^{\text{AC}} \\
 & = (L^{\text{AC}} + L^{\text{DC}}) / (1 - \eta_{\text{DC}} + \eta_{\text{DC}} / e_{\text{AC/DC}}) \\
 & (\because P^{\text{DC}} = \eta_{\text{DC}} \cdot P) \quad (3)
 \end{aligned}$$

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

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

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

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

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.

2. 신재생에너지를 이용한 전력 공급

신재생에너지는 크게 출력 제어가 가능한 발전 형태와 출력 제어가 불가능한 발전 형태로 나눌 수 있다.

풍력 발전(WT)의 경우 다음 식을 통해서 알 수 있듯이, 풍속과 설치 위치에 따른 공기 밀도에 의해 출력이 결정된다.

$$P(t) = \frac{1}{2} C_p \rho V(t)^3 A \quad (8)$$

C_p : 풍력 에너지가 터빈 회전자에 공급되는 비율
 ρ : 공기 밀도 [kg/m³]
 V : 풍속 [m/s]
 A : 회전판 면적 [m²]

또한, 태양광 발전(PV)의 경우에는 일사량과 온도에 따른 에너지 변환 효율에 의해 출력량이 결정된다.

$$P(t) = k_{pv} \cdot e_c \cdot A \cdot G(t) \quad (9)$$

k_{pv} : 보정 계수
 e_c : 에너지 변환 효율
 A : 태양전지 면적 [m²]
 $G(t)$: 일사량 [W/m²]

그러나, 연료전지(FC)나 배터리(Bat.)의 경우 화학적 반응을 통해 전기 에너지를 생산하는 방식이므로 제어가 가능한 형태의 신재생에너지이다. 따라서, 일반적으로 신재생에너지를 통한 안정적이고 신뢰성 있는 발전을 위해 출력 제어가 가능한 저장 장치를 같이 연계한다. 그러나, 현재 저장 장치의 경제성이 높지 않아 대용량의 연계는 어려운 실정이다.

다음 그림은 신재생에너지를 통한 DC 전원 공급 개념도를 나타낸다.

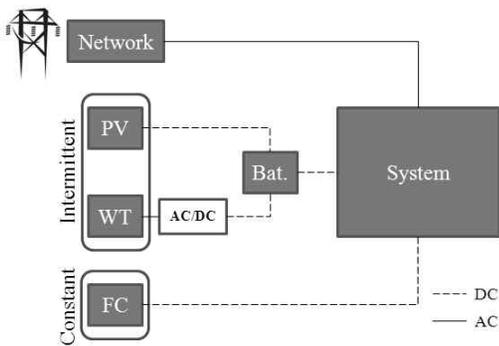


그림 2. 신재생에너지를 통한 DC 전원 공급 개념도

위의 그림에서 AC/DC는 풍력 발전이 AC 전력을 생산하므로 배터리에 전력을 저장하기 위해 전력 변환 과정을 거치는 것을 나타낸다.

3. DC 전원 공급에 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.

다음 그림은 연도별 태양광 발전과 coal-based 발전의 전력 단가 추이를 나타낸다[6].

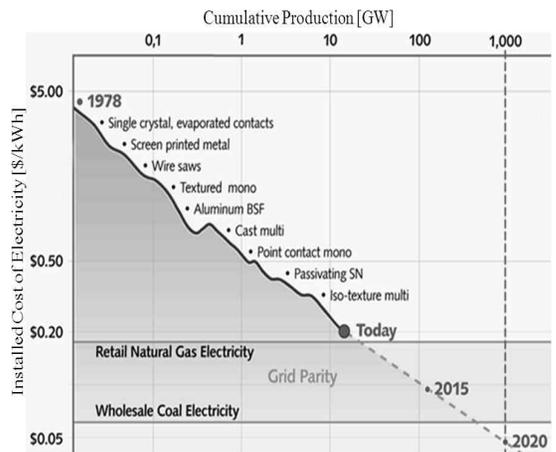


그림 3. 태양광 발전의 Grid Parity

위의 그림에서도 알 수 있듯이 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.

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

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

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

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

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

$C_n(P^{\text{AC}}, P^{\text{DC}})$: n년 후, 전력 공급에 따른 총 비용
$C_n^{\text{market}}(P^{\text{AC}})$: n년 후, 총 전력 구매 비용 [₩]
$C_n^{\text{RES}}(P^{\text{DC}})$: n년 후, 신재생에너지 총 전력 생산 비용 [₩]
C^{market} : 현 전력 구매 가격 [₩/kWh]
C_i^{RES} : i번째 신재생에너지의 현 발전 비용 [₩/kWh]
P_i^{DC} : i번째 신재생에너지의 발전량 [kWh]
γ^{market} : 전력 시장 가격 증가율
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[7]. 다음 식은 탄소배출 비용 증가율을 고려하여 n년 후, 발전량에 따른 탄소배출 비용을 나타낸다.

$$C_n^{\text{CO}_2}(P^{\text{AC}}) = \Xi \cdot (1 + \gamma^{\text{CO}_2})^n \cdot C^{\text{CO}_2} \cdot P^{\text{AC}} \quad (13)$$

$C_n^{\text{CO}_2}(P^{\text{AC}})$: n년 후, 외부 계통을 통한 전력공급시 총 탄소배출 비용
Ξ : 국내 단위 전력 생산량 대비 탄소배출 계수 [CO ₂ -kg/kWh]
γ^{CO_2} : 탄소배출 비용 증가율
C^{CO_2} : 현 탄소배출 비용 [₩/CO ₂ -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.

$$C_n^{\text{RES}}(P^{\text{DC}}) = \sum_{i \in \text{RES}} (1 - \gamma_i^{\text{RES}})^n \cdot C_i^{\text{RES}} \cdot P_i^{\text{DC}} - C_n^{\text{CO}_2}(P^{\text{DC}}) \quad (14)$$

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

따라서, n년도에 DC 전원 공급율에 따른 총 비용 편차는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta C_n(P, \eta_{\text{DC}}) = C_n(P, \eta_{\text{DC}}) - C_n(P, 0) \quad (15)$$

4. 사례연구

신재생에너지가 연계된 배전계통에서 DC 전원 공급율에 따른 신재생에너지의 경제성을 평가하기 위

해, 공주 정수처리장을 대상으로 사례연구를 모의하였다. 공주 정수처리 시스템을 부하 말단의 전원 형태에 따라 구분하면 다음 표와 같고, 이 때 역률은 0.92로 가정하였다.

표 2. 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 3. 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

신재생에너지를 이용한 DC 전원 공급율이 0인 경우는 기존의 전력망을 통해 AC 전력을 공급받는 현 정수처리 시스템을 나타내며, DC 전원 공급율이 1에 가까워질수록 시스템 내부에서 자체적으로 DC 형태의 에너지 생산 비중이 높아지는 상태, 즉, 에너지 자립도가 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 가정하였다. 따라서, DC 전원 공급율에 따른 탄소배출 저감량은 다음 그림과 같이 나타낼 수 있다.

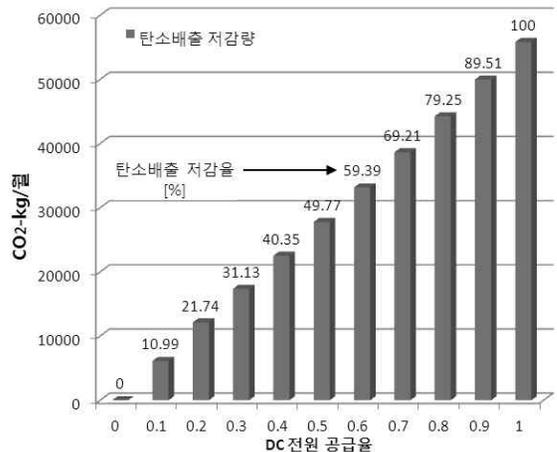


그림 4. DC 전원 공급율에 따른 탄소배출 저감량

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 전기요

금, 태양광 발전 단가 및 탄소배출 비용에 관한 데이터는 다음과 같다.

표 4. 총 전력 공급 비용 산정을 위한 데이터

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

현 시점의 전력 구매 요금은 공주 정수처리장에서 적용 중인 요금 체계(산업용(갑) 고압A 선택 II)의 평균 가격을 적용하였다.

태양광 발전 비용은 국내/외 태양광 발전 단가를 기준으로, 탄소배출 비용은 2010년 4월 EUA 가격을 기준으로 산정하였다. 따라서, 위의 데이터를 적용하여 연도별 DC 전원 공급율에 따른 AC 전력 공급 비용을 그림 5와 같이 나타낼 수 있으며, 연차가 증가할수록 전력 구매 가격이 상승하므로 AC 전력 공급 비용은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, DC 전원 공급율이 증가할수록 계통을 통해 공급받는 AC

전력량이 감소하므로 그 비용 또한 감소하는 것을 확인할 수 있다.

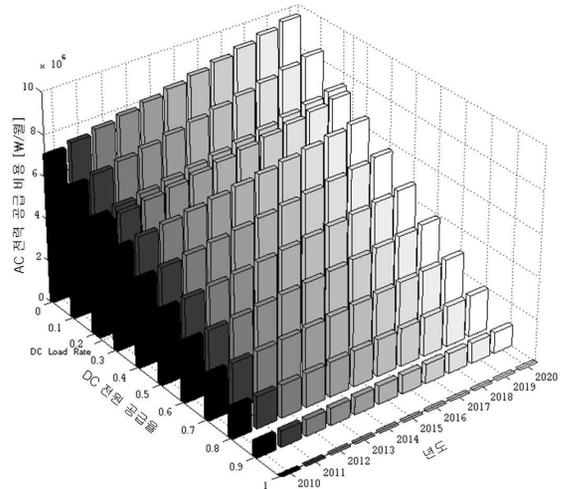


그림 5. DC 전원 공급율에 따른 연간 AC 전력 공급 비용

같은 방식으로, DC 전원 공급율에 따른 DC 전력 공급 비용을 그림 6과 같이 나타낼 수 있으며, DC 전원 공급 비용은 태양광 발전의 감소율에 의해 매년 감

표 5. 식 (15)를 이용한 총 비용 편차

η_{DC}	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	2192858	1640594	1176831	786362	456559	176941	-61203	-265104	-440772	-593197	-726532
0.2	4338047	3245524	2328080	1555629	903195	350036	-121075	-524444	-871962	-1173499	-1437269
0.22	4789204	3583060	2570201	1717415	997128	386440	-133667	-578987	-962645	-1295543	-1586745
0.3	6662641	5017921	3637441	2475819	1495375	664822	-41830	-646158	-1166095	-1616535	-2009861
0.4	9087784	6875331	5018970	3457564	2140351	1025182	77051	-733112	-1429459	-2032057	-2557581
0.5	11563984	8771846	6429585	4459977	2798905	1393130	198436	-821894	-1698367	-2456325	-3116831
0.6	14092866	10708712	7870214	5483718	3471472	1768906	322403	-912566	-1972997	-2889620	-3687979
0.7	16676133	12687229	9341822	6529474	4158500	2152763	449036	-1005189	-2253532	-3332235	-4271410
0.8	19315560	14708761	10845424	7597967	4860465	2544965	578423	-1099824	-2540167	-3784469	-4867526
0.9	22012995	16774720	12382070	8689941.0	5577860.0	2945788.0	710652.0	-1196539	-2833100	-4246645	-5476742
1.0	24770373	18886589	13952863	9806181.0	6311193.0	3355517.0	845820.0	-1295403	-3132545	-4719090	-6099497

소하는 것을 확인할 수 있다.

탄소배출 저감 비용을 고려한 n년도에 DC 전원 공급율에 따른 총 비용 편차($\Delta C_n(P, \eta_{DC})$)는 표 5에 나타내었다.

2016년을 기점으로 신재생에너지를 통한 전력 공급이 총 비용 측면에서 이익으로 작용하는 구간이 존재하며, 그 이후부터는 DC 전원 공급율이 높아질수록 비용 이익으로 작용한다는 것을 확인할 수 있다.

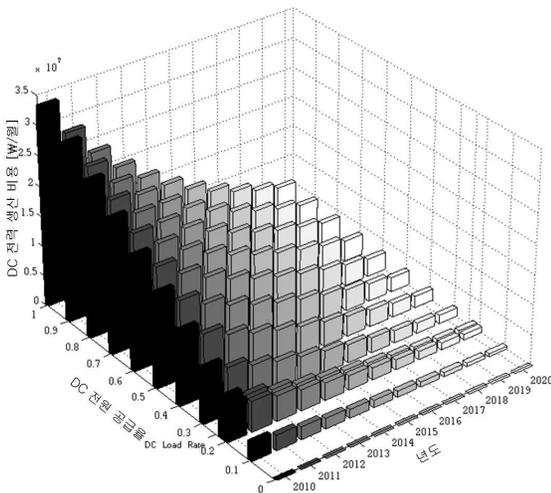


그림 6. DC 전원 공급율에 따른 연간 DC 전력 공급 비용

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.

5. 결 론

본 연구는 현재 DC 부하에 대해 AC/DC 전력 변환을 통해 전력을 공급하는 과정에서 발생하는 불필요한 전력 손실을 줄이기 위해 DC 전원 공급율을 증가시킬 때, 전력 구입 비용, 신재생에너지를 통한 전

력 생산 비용 및 탄소배출 저감 이익을 고려한 총 전력 공급 비용을 산정하는 기법을 제안한다. 이 때, Grid Parity를 고려하여 DC 전원 공급율에 따른 전력 공급의 이익 분기점을 분석한다.

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.

참고문헌

- [1] 정범진, 목형수, 주재훈, 손성용, “분산전원 연계형 DC배전 기반 주거공간에서의 계통운용효율 고찰”, 대한전기학회, 2010 대한전기학회 제41회 하계학술대회 2010.7, pp.430~432.
- [2] 윤성문, 박찬용, 신혜수, 엄태준, 원동준, “신재생 에너지와 DC부하를 고려한 DC배전의 효율 검토”, 대한전기학회, 2010 대한전기학회 제41회 하계학술대회 2010.7, pp.2245~2246.
- [3] 이경배, 변두균, 김종경, “신재생에너지로서 수력발전 개발의 활성화 전략”, 대한전기학회, 2010 대한전기학회 제41회 하계학술대회 2010.7, pp.1231~1232.
- [4] 장성규, 허재선, 조성민, 신희상, 김재철, “공동주택의 전기 자동차 보급예측에 의한 충전설비 계획에 관한 연구”, 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회논문지, 제24권 제10호 2010.10, pp.114~122.
- [5] 손성용, 목형수, 박경석, 홍준희, “교류배전시스템과 직류배전시스템이 적용된 IDC 전력효율 비교연구”, 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회논문지, 제22권 제8호 2008.8, pp.38~44.
- [6] www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2010/08/test10?cmpid=SolarNL-Tuesday-August17-2010.
- [7] Sung-Yul Kim, In-Su Bae, Jin-O Kim, “The Optimal Operation for Community Energy System Using a Low-Carbon Paradigm with Phase-Type Particle Swarm Optimization”, 대한전기학회, Journal of Electrical Engineering & Technology, 2010.11, pp.530~537.

◇ 저 자 소 개 ◇



김성열(金成烈)

2007년 한양대 전자전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 현재 계명대학교 에너지공학과 조교수.

Tel : (053)580-5251

E-mail : energy@kmu.ac.kr