

태양광발전의 운용효율분석을 위한 시스템 모델링

최연옥, 조금배, 백형래, 정헌상*, 이만근, 정명웅**

* 조선대학교 ** 한국에너지 기술연구소

System Modeling for Operating Efficiency Analysis of Photovoltaics

Y.O.Choi, G.B.Cho, H.L.Baek, H.S.Chung*, M.G.Lee, M.W.Jung**

* Chosun University **Korea Institute of Energy Research

Abstract - The primary concern in designing any PV system is the determination of its optimum size. It is generally inadequate to use monthly or daily average insolation, and estimated number of continuous no sun days to determine array and battery capacities because the dynamic behavior of PV system and the stochastic nature of solar radiation also significantly influence the required array and storage capacity. Simulation method uses hourly meteorological data and hourly load data to simulate the energy flow in a PV system, and predicts the system reliabilities under assumed array and battery sizes.

Stand alone system for operating efficiency analysis of Photovoltaics system were described in this paper.

서론

태양광 발전시스템은 태양전지, 축전지 부하에 전력을 공급하는 전력변환장치 등으로 구성되는 단순한 시스템이며 기본적으로 가동부분이 없기 때문에 보수 점검이 매우 편리하고 무인자동화 운전이 가능하며 그 운용에 있어서 지구환경에 악영향을 주는 배출물이 없다. 또한 수용지점에 근접하여 설치가 가능하므로 송전손실 등이 없으며 시스템의 효율은 기본적으로 규모에 의존하지 않기 때문에 소규모 발전에서도 충분한 성능을 발휘할 수 있다. 그러나 아직까지는 사용전원에 비하여 발전 전력은 기상조건 등에 의해 크게 영향을 받는다.

태양전지 어레이의 출력특성은 일사량, 온도 등에 따라 변화하고 최대 출력점은 시시각각 변하기 때문에 변환효율이 매우 낮은 태양전지에서 많은 전기에너지를 얻기 위해서는 태양전지의 동작점을 항상 최대 출력점에서 동작할 수 있도록 해야한다. 따라서 본 논문에서는 시스템의 운용 효율의 이론

적 해석 방법을 검토하고 시스템의 이론적 분석 및 변수추출과 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 수학적 인 모델링에 의해 독립형 태양광 발전 시스템의 표준화된 지표를 찾고자 하였다. 또한 태양광 발전 시스템의 최적의 규격선정을 위해 시스템 신뢰도를 평가하고 규격선정시 부하 이력의 영향등을 고찰함과 동시에 시뮬레이션의 결과로부터 이론의 타당성을 검토하였다.

시스템 구성요소의 모델링

그림 1은 독립형 시스템의 블럭선도로서 어레이, 축전지, 충전기 및 발전기로 구성된다. 기상학적 데이터 즉 일사량, 대기 온도 및 부하소비 전력은 시스템의 운전에 영향을 끼치는 요소들이다.

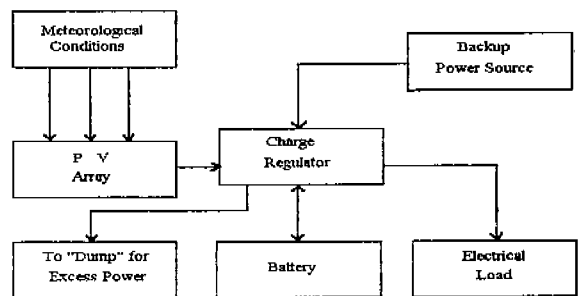


Fig. 1 Basic block diagram of stand-alone system.

일사량 데이터 베이스

계산시간을 단축시키기 위하여 시뮬레이션에 사용되는 일사량 데이터 베이스로는 연간 매시간마다 발생하는 대표적인 총 일사량을 사용하였다. 태양 일사 데이터 베이스의 지원은 "RAMP 1.0" 소프트웨어이다. 이 소프트웨어는 주어진 기간 동안 경사진 평판상의 매시간 발생하는 총 일사량을 시뮬레이션 할 수 있다. RAMP 1.0에 사용되는 태양

일사 모델은 우리나라에서 수집된 데이터에 기초한 Binomial 분포일사 모델이다.

대기 온도 모델

하루중 최대 및 최소 대기온도를 포함하는 교번 대기 온도 모델을 적용하였다.

$$T_a(t) = \frac{[(T_{max} + T_{min}) + (T_{max} - T_{min})\sin(\omega t)]}{2} \quad (1)$$

여기서 $T_a(t)$: 시간 t 에서의 대기온도

T_{max} : 일중의 최대 대기온도

T_{min} : 일중의 최소 대기온도

최소 대기온도가 03시에 발생되고 최대 대기온도가 15시에 발생된다고 가정하면 $t = hr-9$ 가 식(1)에 적용된다. T_{max} 와 T_{min} 의 계절적 변동은 1년을 8주기로 구분하고 각 주기마다 평균 T_{max} 와 T_{min} 을 취하였다.

어레이 I-V 모델

태양광 발전 어레이는 병렬로 연결된 모듈로 구분되며 각 모듈의 I-V 특성은 주어진 온도 T_{OC} 와 일사량 L_0 으로 나타낸다.

$$I = I_{SC} \{1 - C_1 [\exp(V/(C_2 V_{OC})) - 1] \} \quad (2)$$

여기서

$$C_1 = (1 - I_{mp}/I_{SC}) \exp[-V_{mp}/(C_2 V_{OC})]$$

$$C_2 = (V_{mp}/V_{OC} - 1/L_n(1 - I_{mp}/I_{SC}))$$

I : 모듈 전류 [A]

I_{mp} : 모듈 최대 전력 전류 [A]

I_{SC} : 모듈 단락 회로 전류 [A]

V : 모듈 전압 [V]

V_{mp} : 모듈 최대 전력 전압 [V]

V_{OC} : 모듈 개방 회로 전압 [V]

일사량 L 과 전지 온도 T_C 에서 I-V 곡선을 취득하기 위하여 다음의 변환을 적용하였다.

$$I_{new} = I + \alpha(T_C - T_{CO}) + (L/L_0 - 1)I_{SC} \quad (3)$$

$$V_{new} = V + \beta(T_C - T_{CO})$$

여기서 $\alpha = \frac{dI_{SC}}{dT} \quad 3L = \text{const} \quad (4)$

$$\beta = \frac{dV_{OC}}{dT} \quad 3L = \text{const}$$

α 와 β 는 각각 I_{SC} 및 V_{OC} 와 관련된 온도 계

수이다.

어레이 온도 모델

일사량, 대기온도 및 풍속에서 어레이 온도를 평가하기 위하여 식 (5)와 같은 단순한 실험적 모델을 사용하였다.

$$T_C = T_a + \phi_1(1 + \phi_T T_a)(1 - \phi_W V_W) \phi \quad (5)$$

여기서 T_C : 어레이 온도 [°C]

T_a : 대기 온도 [°C]

V_W : 풍속 [m/sec]

m : 입사되는 태양광량 [w/m^2]

ϕ_1, ϕ_T 및 ϕ_W 는 상수로 실험 데이터에 의해 결정된다.

본 연구에서는 $\phi_1=0.0138, \phi_T=0.031$ 및 $\phi_W=0.042$ 를 사용하였으며 풍속은 모델을 쉽게 하기 위하여 1[m/sec]인 상수로 주어졌다. 교정 계수 $(1-1.055 \phi)$ 는 전기 출력 효과를 위하여 식(5)를 도입하였다. 여기서 ϕ 은 어레이 효율이다.

부하 모델

태양광발전 전기설비에서 공급받는 3개의 각기 다른 일일 부하율 선정하였다. 이들 이력들은 시간마다 정의되고 연간 전기 소비량은 상수로 취급하였다. 그림 2는 이들 세가지 이력 즉 일정한 수요, 하나의 첨두치를 갖는 일정한 수요 및 코사인 함수 이력을 나타낸다. 시뮬레이션 프로그램에서 다음과 같은 세가지 정의된 값을 사용하였다.

여기에서 규격 선정 연구를 위하여 일간 에너지 소비 전력 E(kwh) E=2, 첨두 수요와 최저 수요의 비 K=10 및 첨두 수요 발생시의 시간, $t_p(\text{hr})=12$ 로 정의하였다.

각 이력의 수학적 공식은 일정한 수요 모델은 식(6)과 같이 나타내고

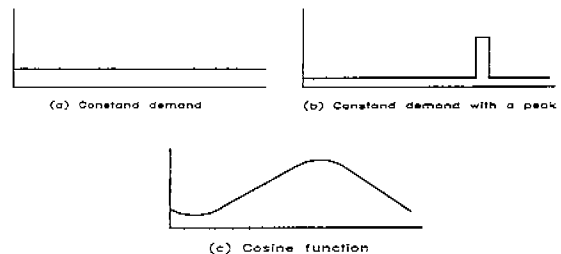


Fig. 2 Load models.

$$D(t) = E/24 \text{ p } D_0 \quad (6)$$

하나의 첨두치를 갖는 일정한 수요 모델은 (7)식으로 나타내고

$$D(t) = KE/(23+K), t = tp \text{시} \quad (7)$$

$$= E/(23+K), t \neq tp \text{시}$$

코사인 함수 모델은 (8)식과 (9)식으로 나타낼 수 있다.

$$D(t) = D_0 + D_m \cos[2\pi c(t-tp)/24] \quad (8)$$

$$D_m = D_0(K-1)/(K+1) \quad (9)$$

여기서 D_0 는 일일평균 전력량이다.

그림 2의 (a) 부하는 규격에 (b)부하와(c)부하는 부하 형태와 첨두 시간의 부하효과를 조사하는데 사용되었다.

충전기

충전기는 어레이, 축전지 및 부하간의 에너지 흐름을 제어한다. 가장 먼저 고려하여야 할 사항은 과충전이나 방전으로부터 축전지를 보호하는 것이다.

부하가 DC 전력만을 소비한다고 가정하면 충전기에 의해 제어되는 전력의 흐름은 우선 어레이가 부하를 부담하도록 배열된다. 잉여 전력은 축전지에 저장된다. 축전지가 완충전되면 잉여전력은 저항성 회로망에서 소비된다. 부하를 어레이 단독으로 부담할 수 없을 때 부족분은 축전지에 의해 부담된다. 축전지 충전상태(State of charge : 이하 SOC)가 최소허용값 즉 용량의 30%로 감소되면 충전기는 부하를 차단한다.

충전기가 분리되어 있는 동안은 부하손실시간(loss of load hours, LOLH)으로 기록되고, 이러한 경우를 부하손실(loss of load event, LOLE)이라 하며, 특정 기간동안 발생 횟수를 부하손실빈도(loss of load frequency, LOLF)로 한다.

축전지 모델

내부 충전 저항값은 고려한 축전지 모델을 축전지의 충전상태(SOC) 계산에 적용하였다. $(t + dt)$ 에서의 축전지 SOC는 에너지 입력(출력), 자기방전 및 손실을 계산하여 현재의 SOC로부터 예견가능하다.

$$S(t+dt) = S(t)(1 - D_s dt) + K_1(V_b - K_2 I_b^2) dt \quad (10)$$

여기서 $S(t)$: 시간 t 에서의 축전지 충전상태

D_s : 축전지 자기방전비율

K_1 : 축전지 충·방전 효율

K_2 : 축전지충·방전저항

V : 시스템 전압

I_b : 축전지 전류

축전지 충·방전 전압 및 저항값은 다음과 같이 나타낸다

$$R_2 = S_{bat}/S_{max}$$

$$V_{ch} = 2 + 0.148 R_2$$

$$V_{dch} = 1.926 + 0.124 R_2$$

$$R_{ch} = (0.758 + 0.1309/(1.06 - R_2))/S_{max} \quad (11)$$

$$R_{dch} = (0.19 + 0.1037/(R_2 - 0.14))/S_{max}$$

여기서 V_{ch}, V_{dch} : 축전지 충·방전 전압

R_{ch}, R_{dch} : 축전지 충·방전 저항

S_{bat} : 축전지 충전상태

S_{max} : 축전지 최대 충전상태

시스템 신뢰도 지수

1년간 누적된 부하손실시간(LOLH)은 사용자에게 예비부하운용 비용을 적절히 반영시키는 태양광 발전 시스템의 신뢰도 지수로서 선정된다. [8] 이 지수는 또한 LOLH가 발전기 운전시간으로 전환되며, 예비전력의 비용이 쉽게 평가됨에 따라 경제적 평가 수단으로도 이용된다.

그림 4의 $Z(t)$ 는 신뢰도 지수 즉, LOLE를 나타낸 것으로 이는 다음과 같은 수학적인 형식을 갖는다.

$$Z(t) = 1, \text{ 부하 차단시} \\ 0, \text{ 부하 연결시} \quad (12)$$

여기서 사용된 신뢰도는 에너지 결핍에 기인한 시스템 이용 불가능성을 나타내며 시스템 설비의 고장에 다른 영향은 포함되지 않는다. 즉, 모든 시스템의 요소는 완벽한 기능을 유지한다고 가정한다.

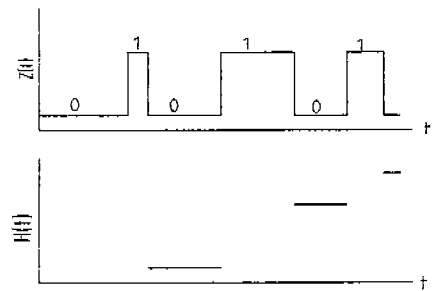


Fig. 3 Loss of load event $Z(t)$ and loss of load hours $H(t)$.

시뮬레이션

시뮬레이션 프로그램의 입력은 부하, 어레이 규모(PVS) 및 축전지 용량(BTYS)를 포함한다. 출력은 주어진 지역의 기상 조건에서의 입력 데이터의 신뢰도 지수이다. LOLE 또한 시뮬레이션으로 주어지거나 이것은 단지 시스템의 성능을 알기 위하여 사용되었다. 기본적인 입출력 배열과 시뮬레이션 프로그램의 지원 데이터베이스는 그림 4에 나타내었다.

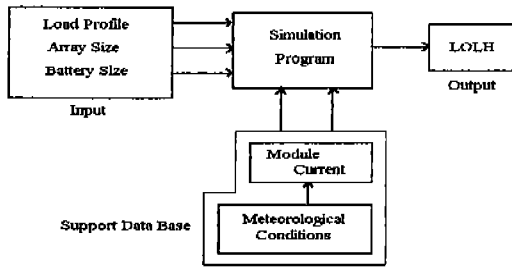


Fig. 4 Support data base of program. 4가지의 어레이 규격과 여러종류의 축전지 용량에서 부하 (a)의 시뮬레이션 출력을 그림 5에 나타내었다. 그림 4는 LOLH - BTYS 좌표상에 LOLH - PVS - BTYS의 관계를 나타낸 것이다. 이것은 동일한 LOLH 값을 나타내는 PVS와 BTYS의 조합을 표현하는 곡선의 형태로 PVS와 BTYS 간의 관계를 나타낸다.

PVS와 BTYS의 조합은 그림 5와 동일한 결과를 나타내며 조합은 PVS-BTYS 좌표상에서 LOLH 곡선을 만든다. 그림 6은 PVS-BTYS 좌표 상에 6개의 LOLH 값에 대응하는 LOLH의 결과를 보여준다. 수정기록에서 취득된 데이터 곡선은 수학적 함수의 역행 곡선이다.

$$f(x) = \exp\left(\sum_{i=0}^6 a_i / X^i\right) \quad (12)$$

파라미터 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_6$ 는 $1/X$ 과 $\log(Y)$ 의 눈금에 알맞는 데이터로의 변환과 다항식 역행 기법에 의하여 계산된다. Iso-LOLH 곡선의 탄젠트 기울기가 규격 선정의 주요 인자이므로 모든 데이터 포인트들을 맞도록 하는 것이 중요하다. 식 (12)는 기본적으로 시뮬레이션 출력의 근사값일지라도 Iso-LOLH 곡선의 분석적인 함수를 나타낸다.

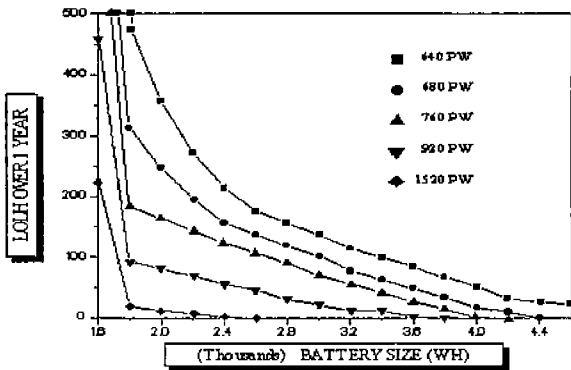


Fig. 5 LOLH vs battery sizes of four array sizes for profile (a).

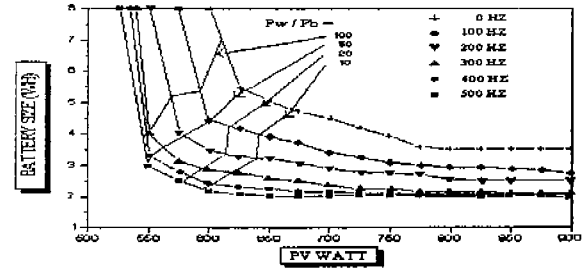


Fig. 6 Iso-LOLH curves and optimum points at four.

여기서 g 는 Iso-LOLH 곡선을 표현하는 함수이다. 수학적인 해를 Lagrange multiplier 방법으로 구하면 $L = P_w(PVS) + P_b(BTYS) + m_L(g - R_0)$ (13) 여기서 m_L 은 Lagrange multiplier 이다. 식(13)을 PVS, BTYS 및 m_L 에 대하여 미분하고 부분적인 편차를 영으로 설정하면

$$P_w + m_L [kg/k(PVS)] = 0 \quad (14)$$

$$P_b + m_L [kg/k(BTYS)] = 0 \quad (15)$$

$$g = R_0 \quad (16)$$

식(14) 및 (15)는 조합하여 쓸 수 있다.

$$[d(BTYS)/d(PVS)] = P_w/P_b \quad (17)$$

식(17)의 좌변은 PVS와 BTYS간의 대체 여유비 (marginal rate of substitution, MRS)이다. 이것은 Iso-LOLH 곡선을 따라 BTYS가 증가할 때 PVS가 감소되는 비율을 나타낸다. 식(17)은 대체여유비가 가격비 P_w/P_b 와 동일한 지점에서 신뢰도 R_0 에 대한 최소 비용이 발생함을 의미한다.

시뮬레이션 결과 및 고찰

규격 선정시 부하 이력의 영향

부하이력 그림 2의 (a)를 제외한 나머지 두 개의 부하이력들(그림 2의 (b) 및 (c))는 최적의 설계점을 찾기 위하여 시뮬레이션 하였다. 여기서 부하이력 (b)와 (c)의 일일 에너지 소비는 부하이력 (a)와 같다.

그림 7은 세 개의 이력에 대하여 LOLH=0에서 규격선정결과 (Iso-LOLH 곡선)를 비교하여 보여준다. 이것은 요구되는 BTYS와 PVS가 태양 일사 이력과 일치되는 부하이력에 비해서 적응을 나타낸다. 예를들어 12시 첨두시간의 코사인 부하이력 (No.c)은 태양광선 이력과 잘 일치한다. 따라서 LOLH=0을 만족시키는 요구되는 저장능력 및 어레이 규격은 세개의 시험 이력중 최소치이다.

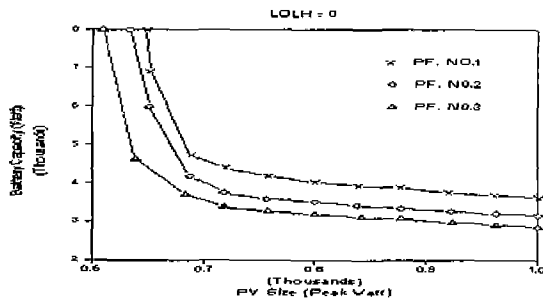


Fig. 7 Comparison of Iso-LOLH curves for three load profiles.

첨두시간 (T_P) 또한 규격 선정에 영향을 끼친다. 만약 첨두 수요가 정오에 발생되면 요구되는 PVS와 BTYS는 보다 적어진다. 그림 9는 두개의 태양광 발전 시스템에 대하여 첨두시간 (T_P)의 LOLH 변동을 나타낸다. 하나는 코사인 부하이력 (No.c)과 일치하며 다른 하나는 이력 No.b와 일치한다. 두개의 시스템은 모두 $T_P=12:00$ 인 경우 $LOLH=0$ 인 조건을 만족시키도록 설계되었다.

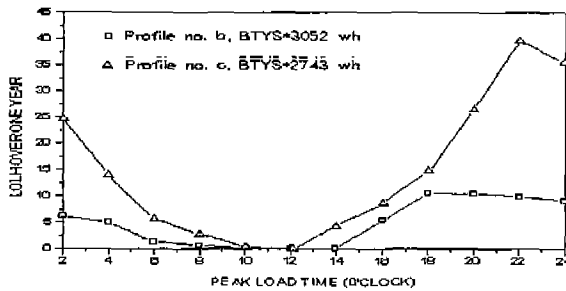


Fig. 8 Variation of LOLH for load profile No. (b) and No. (c).

T_P 가 12:00으로 부터 멀어질수록 LOLH가 증가하는 것을 알 수 있다. 부하패턴은 어떤 부하가 야간으로 부터 주간으로 전이되었을 경우 단독 태양광 발전 시스템을 위해 부하관리가 중요시됨을 의미하므로 어레이와 축전지에의 투자가 감소될 수 있음을 나타내고 있다.

부하손실 빈도(LOLF)와 축전지 운전

Iso-LOLH 곡선상의 모든 PVS-BTYS 조합이 동일한 예상 LOLH 값을 야기할지라도 해당 LOLH 즉, 주어진 기간동안의 LOLE의 수는 확실히 다르다. 큰 PVS와 적은 BTYS를 지닌 태양광 발전 시스템에서 축전지는 높은 충·방전 비율을 가지게 되어 평균 LOLE기간이 짧아지나 한편으로 LOLE가 빈번히 발생한다. 즉 큰 BTYS와 적은 PVS는 낮은 충·방전 비율을 초래하여 LOLE가 긴 주기를 갖는다. 따라서 LOLH의 어떤 값에서

즉 1년간의 모든 기간의 합에서 적은 PVS와 큰 BTYS를 갖는 시스템은 낮은 LOLF를 갖는다. 물론 반대의 경우에는 높은 LOLF를 갖는다. 5개의 LOLH 값에 있어서 PVS에 대한 LOLF의 관계를 그림 9에 나타내었다. 주어진 LOLH 값을 발생시키기 위해 PVS에 매칭시킨 축전지 용량은 그림 6으로 부터 알 수 있다.

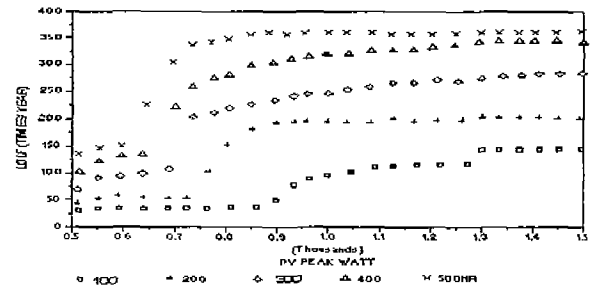
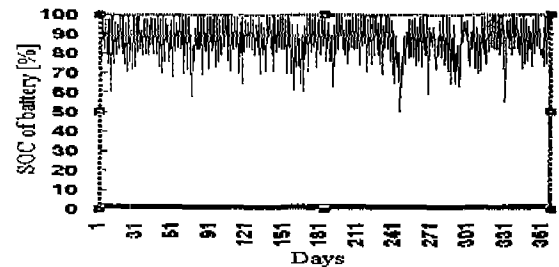


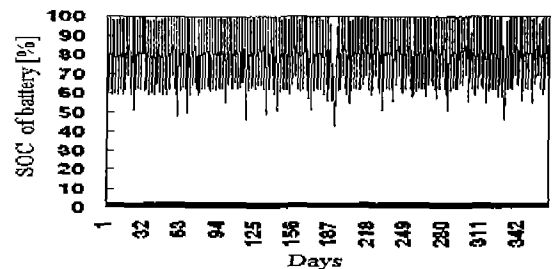
Fig. 9 Variations of LOLF with array sizes at five LOLH values.



(a) A Shallow cycle system



(b) A Deep cycle system



(c) Mediate cose between (a) and (b)

Fig. 10 Variation of battery SOC over one year.

전력시스템 엔지니어링에서 사용자는 LOLH 보다 는 LOLF에 보다 민감하므로 LOLF는 중요한 신뢰도 지수이다. 그러나 여기에서는 디젤 발전기가 단독 태양광 발전 시스템 축전지 충전용 LOLF의 제어는 쉽다.

LOLF에 부가하여 축전지 운전 또한 PVS-BTYS 조합에 영향을 받으며 적은 BTYS 시스템의 높은 충·방전 비율 때문에 축전지는 야간에 높은 백분율의 방전을 일으키며 주간에는 재충전을 실시한다. 이것을 사이클운전이라 한다. 사이클 시스템은 매 밤마다 축전지 뱅크의 적은 부분만을 사용한다. 그림 10은 LOLH=0 조건을 만족시키는 3개의 각기 다른 설계에 있어서 1년간의 축전지 SOC 변동을 보여준다. 시험된 부하이력은 그림 2의 (a)이다. 그림 10(a)는 큰 BTYS 시스템 (PVS=560 PW, BTYS=48198 Wh)를 나타낸다. 각 사이클은 축전지 용량의 약 5%를 사용하였다. 그림 10(b) (PVS=1000 PW, BTYS=3526Wh)는 매 밤마다 축전지 용량의 약 36%를 사용하는 방전을 나타낸다. 중간인 경우 (PVS=680 PW, BTYS=4568 Wh)는 그림 10(c)로서 매 밤마다 축전지 용량의 약 26%를 사용한다.

주어진 축전지의 여러 운전에서는 축전지의 종류 선택이 중요하다. 낮은 자기방전비율을 갖는 축전지는 장시간 동안 에너지를 저장하기 위하여 긴 수명과 높은 충방전율을 지닌 축전지를 필요로 한다.

그림 9는 축전지 용량이 완전히 사용되지 않는 것 즉, 축전지 SOC가 대부분의 시간에서 부동충전 상태인 것이다. 그림 10(a)는 1년중 단지 11일만이 60% 이하임을 보여주며 또한 그림 10(c)는 1년의 5분의 1동안만 70% 미만임을 보여준다.

시스템은 호린날을 고려하여 설계되었으며 예비전력이 백분율상에서 상대적으로 낮은 호린날을 대비하기 위하여 도입되었다면 요구되는 축전지 용량은 어레이의 규격과 투자비도 감소될 수 있다는 것을 나타내고 있다.

결 론

태양광 발전은 기술발전에 따라 이용 가능성이 거의 무한대에 가까운 풍부한 자원이지만 기상조건 변화에 의해 발전량이 일정하지 못하기 때문에 이에 대응하는 시스템의 이용 효율을 향상시키기 위해서 태양광 발전의 부분 및 종합시스템의 이론적 분석 및 수학적 모델링에 의해서 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 시스템의 표준화된 지표를 찾

고자 하였다.

앞으로 태양광발전시스템의 보급확진을 위해서는 체계적인 기술개발과 아울러 제품과 성능 기준에 대한 규격화와 관련법규의 제정, 제조업체 및 전력회사의 적극적인 참여 및 지원정책 수립이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] F.Lasnie, et al., "Solar Photovoltaic Hand Book", Energy Technolg Division Asian Institute of Technology, 1988.
- [2] B. K. Doe, et al., "Hand book for Battery Energy Storage Photovoltaic Power System", SAN-2192-TI, 3, 1979.
- [3] E. E. Landsam, et al., "Maximum Power Trackers for Photovoltaic Arrays", MIT/LINCOLN Laboratory, COO - 4094 -17, 1980.
- [4] D. A. Fox, et al., "Peak Power Tracking Technique for Photovoltaic Arrays", IEEE, PESC Record, PP. 425-428, 1982.
- [5] A. Charotte, et al., "Variable Frequency and Variable Phase Shift Control of Dual Series Resonant Converter for Utility Interface", IECON, PP. 563 - 568, 1988.

본 연구는 한국에너지 기술연구소 대체에너지 기술개발 사업의 위탁과제, 수행 결과의 일부임.