

## 예비축전지를 갖는 배전계통 전압강하의 비용최적 설계

조 일권° 김 만고

한국통신 서울전자교환운용연구단

## An optimal design guideline for voltage drop of DC distribution system with batteries

Il-Kwon Cho Marn-Go Kim

Seoul Electronic Switching Operation Research Center, Korea Telecom

## Abstract

The voltage drop in distribution path of battery-reserved DC power system can affect the total of battery, cable and electricity costs. To determine an optimum voltage drop in distribution path for minimizing the total cost, battery, cable and electricity costs are represented as a function of the voltage drop, respectively, and are summed up to the total cost. An optimum voltage drop is selected as the value giving the minimum total cost.

In this paper, a design technique of optimum voltage drop in distribution path of DC power system is proposed to minimize the total of battery, cable and electricity costs. The design procedure is described and design curve for selecting optimum voltage drop is also presented as a function of distribution distance.

## I. 서 론

예비축전지를 갖는 직류전원공급시스템의 배전계통은 일반적으로 (그림 1)과 같이 표시될 수 있다. (그림 1)에서, 배전계통의 전압강하는 축전지 용량, 배전 케이블의 굽기 및 전압강하로 인한 전력손실에 직결적인 영향을 미치므로 전압강하의 최적설계가 중요한 문제로 대두된다.

축전지의 용량을 산출하기 위해서는 축전지에서 부하까지의 전압강하와 부하의 허용최저전압, 축전지 Cell 수 및 구간의 예비시간 등의 정보가 필요하다. 그리고 전압강하는 배선의 굽기와 직접적인 관계가 있고, 전압강하에 의한 전력손실과 관계가 있다. 즉, 전압강하의 크기에 따라 축전지 용량, 케이블 굽기 및 전력손실 등의 값이 달라질 수 있는 것이다.

일반적으로 축전지와 부하사이의 총 배선 거리는 1차분

배반과 2차분배반 사이의 거리가 대부분을 차지하므로 이

구간의 전압강하를 최적설계하는 것이 비용측면에서 상당히 중요하다고 볼 수 있다. 그리고 축전지의 용량산출을 위

한 용량산출계수는 축전지의 최저 사용전압과 예비시간을

파라미터로써 결정되는데 비선형적인 특성을 나타낸다.

본고에서는 축전지 용량, 배전 케이블의 굽기 및 전력손실

에 의한 비용을 최소화하는 1차분배반과 2차분배반 사이의

전압강하( $V_d = V_1 - V_2$ )를 설계하고자 한다.

## II. 비용요소의 산출

## 1. 축전지 비용요소

가. 축전지 용량산출  
축전지의 용량은 부하전류( $I$ )가 얻어지면 다음 공식에 의하여 구할 수 있다.

$$\text{축전지용량} = K(I) \quad (1)$$

여기서  $K$ 는 축전지 용량산출계수로써 일반적으로 (그림 2)의 표를 이용하여 구한다. (그림 2)의 표에서  $K$ 값을 구하기 위해서는 축전지 최저사용전압(MVPC : Minimum Voltage Per Cell)을 결정하여야 하는데, MVPC는 (그림 1)에서 다음과식으로 주어진다.

$$\text{MVPC} = \frac{V_{L(\text{MIN})} + (V_B - V_L)}{N_{\text{CELL}}} \quad (2a)$$

$$= \frac{V_{2(\text{MIN})} + Vd1 + Vd}{N_{\text{CELL}}} \quad (2b)$$

여기서  $V_{L(\text{MIN})}$  : 부하의 허용최소전압

$N_{\text{CELL}}$  : 축전지 cell 수

$V_{2(\text{MIN})}$  : 2차 분배반에서의 허용최소전압

위 식에서 보면, MVPC를 결정하기 위해서는  $Vd$ 를 결정해야 할 수 있다. 즉  $Vd$ 가 결정되어야 MVPC가 결정되고  $K$ 값을 구할 수 있음을 나타낸다.

## 나. 구간 선형화

(그림 2)의 조건표에서 보면,  $K$ 값의 함수가 MVPC에 대하여 비선형 특성을 가지므로, MVPC가 보통 1.8~1.88 범위내에 있음을 감안하여, (그림 3)에 표시된 것처럼 예비율 3시간 평균(현재 대부분의 전화국에서 3시간 예비율을 적용하고 있음)을 기준으로 구간선형화 방법을 적용하여  $K$ 값을 MVPC의 함수로 표시하면 다음과 같다.

$$K = 18.75 * \text{MVPC} - 28.85, (1.8 < \text{MVPC} < 1.88) \quad (3a)$$

여기서, 선형화 구간을 세분화 하여 적용하면 보다 정확한 모델이 될 수 있으나, 식 (3a)와 같이 하여도 원래 평균화의 최대 오차값이 5% 미만이므로 타당성이 있다고 볼 수 있다.  $K$ 값을  $Vd$ 의 함수로 표시하기 위하여, 식 (3a)에 식 (2b)를 적용하면 다음과 같이 표시된다.

$$K = \frac{18.75 * (V_{2(\text{MIN})} + Vd1 + Vd) - 28.85 * N_{\text{CELL}}}{N_{\text{CELL}}} \quad (3b)$$

## 2. 케이블 및 전력손실 비용요소

(그림 1)에서 1차 분배반과 2차 분배반 사이의 전압강하( $Vd$ )를 만족시키는 케이블의 굽기는 다음과 같이 표시된다.

$$S = \frac{R \times \text{Dist} \times I}{Vd} \quad (\text{mm}^2) \quad (4)$$

여기서  $R$  : 케이블의 단위전장( $\text{mm}^2$ )

$\text{Dist}$  : 케이블의 페루프 길이( $\text{m}$ )

$I$  : 부하전류( $\text{A}$ )

$Vd$  : 전압강하( $\text{V}$ )

그리고 정상상태에서 전압강하( $Vd$ )에 의한 전력손실은 다음과 같이 표시된다.

$$\text{전력손실} = \frac{Vd \times I}{1000} \quad (\text{KW}) \quad (5)$$

여기서  $I$  : 부하전류( $\text{A}$ )

$Vd$  : 전압강하( $\text{V}$ )

## III. 연간비용의 최적화

## 1. 연간비용

축전지, 케이블 및 전력손실의 비용을 산출하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 축전지 수명(Life Cycle) : 6년

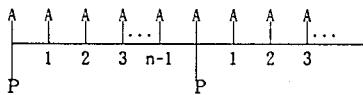
- 케이블 수명(Life Cycle) : 8년

- 연 이율 : 12%

- 각 종 뷔즈나 선트저항에 의한 전압강하는 무시함.

투자설비의 수명이 같지 않기 때문에 투자비용을 비교하기 위해서는 연간투자비용의 비교가 필요하다. 그래서 위의 가정을 다음과의 계산식에 적용하면 축전지와 케이블에 대한 연간비용의 산출이 가능하게 된다.

$$A = P \times \frac{i \times (1+i)^n - 1}{(1+i)^n - 1} \quad (6)$$



여기서 A : 초기의 연간 투자비용  
P : 초기투자 비용  
i : 연이율  
n : 수명(Life Cycle)

가. 축전지  
축전지의 연간비용( $A_B$ )은  $n = 6$ ,  $i = 0.12$ 를 식 (6)에 적용하면 다음과 같다.

$$A_B = P_B \times \frac{0.12 \times (1+0.12)^6}{(1+0.12)^6 - 1} = 0.217 \times P_B$$

그리고 축전지의 초기투자비용( $P_B$ )는 다음과 같이 산출될 수 있다.

$$P_B = KI \times N_{CELL} \times W_B (\text{원})$$

여기서 KI : 축전지의 용량(AH)  
 $N_{CELL}$  : cell 수  
 $W_B$  : 축전지의 AH당 비용(원/AH)

따라서 축전지의 초기투자비용( $P_B$ )은 식 (3b)의 K값을 위의 식에 적용하면 다음과 같이 산출된다.

$$P_B = [18.75 \times (V_{20\text{MIN}} + Vd_1 + Vd) - 28.85 \times N_{CELL}]$$

그리므로 축전지의 연간비용( $A_B$ )은 다음과 같다.

$$A_B = 0.217 \times [18.75 \times (V_{20\text{MIN}} + Vd_1 + Vd) - 28.85 \times N_{CELL}] \times I \times W_B (\text{원}) \quad (7a)$$

위의 식에서  $Vd$ 에 관계되는 비용( $A_{Bd}$ )는 다음과 같다.

$$A_{Bd} = 0.217 \times 18.75 \times Vd \times I \times W_B (\text{원}) \quad (7b)$$

나. 케이블  
케이블의 연간비용( $A_C$ )은  $n = 8$ ,  $i = 0.12$ 를 식 (6)에 적용하면 다음과 같다.

$$A_C = P_C \times \frac{0.12 \times (1+0.12)^8}{(1+0.12)^8 - 1} = 0.18 \times P_C$$

그리고 케이블의 초기투자비용( $P_C$ )는 다음과 같이 산출된다.

$$P_C = S \times Dist \times W_C (\text{원})$$

여기서 S : 케이블의 단면적( $\text{mm}^2$ )  
Dist : 케이블의 루프길이(m)  
 $W_C$  : 단위면적 당 단위길이 비용(원/ $\text{mm}^2 \cdot \text{m}$ )

즉, 케이블의 초기투자비용( $P_C$ )은 식 (4)로부터 다음과 같이 산출된다.

$$P_C = \frac{0.018 \times I \times Dist}{Vd} \times Dist \times W_C (\text{원})$$

따라서 케이블의 연간비용( $A_C$ )은 다음과 같다.

$$A_C = \frac{0.18 \times 0.018 \times I \times Dist}{Vd} \times Dist \times W_C (\text{원}) \quad (8)$$

다. 전력손실  
전력손실의 연간비용( $A_E$ )은 식 (5)로 부터 다음과 같이 산출된다.

$$A_E = \frac{I \times Vd}{e \times 1000} \times h \times W_E (\text{원}) \quad (9)$$

여기서  $e$  : 축전지의 효율(0.9 이상)  
 $Vd$  : 전압강하(V)  
 $h$  : 연간 시간(H)  
 $W_E$  : kWh 당 전기요금(원/kWh)

따라서 전력손실의 연간비용( $A_E$ )은 다음과 같다.

$$A_E = \frac{I \times Vd \times 24 \times 365 \times W_E}{900} (\text{원}) \quad (10)$$

2. 비용의 최적화  
총연간비용( $A_T$ )은 축전지, 케이블 및 전력손실 연간비용의 합으로 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$A_T = A_B + A_C + A_E \quad (11)$$

식 (11)을 이용하여  $A_T$ 를 최소화하는  $Vd$ 는 다음식을 만족하는 값을 구하면 된다.

$$\frac{dA_T}{dVd} = \frac{dA_B}{dVd} + \frac{dA_C}{dVd} + \frac{dA_E}{dVd} = 0 \quad (12)$$

식 (12)로부터 식 (7)-(10)을 적용하여  $Vd$ 를 계산하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{0.00324 \times I \times W_C \times Dist^2}{Vd^2} = 4 \times I \times W_B + 9.7 \times I \times W_E$$

따라서,

$$Vd = \left( \frac{0.00324 W_C}{4 W_B + 9.7 W_E} \right)^{1/2} \times Dist \quad (13)$$

식 (13)은 충전연간비용을 최소화하기 위한 최적의 전압강하는 축전지 전기요금 및 케이블의 비용에 대한 파라미터로 배선거리에 비례하여 나타남을 볼 수 있다.

### 3. 전압강하의 계산

식 (13)으로부터  $Vd$ 를 계산하기 위해서는  $W_B$ ,  $W_C$ ,  $W_E$ 의 값을 구할 필요가 있다. '93년도 물가정보로부터, 납 축전지의 가격은 <표 1>과 같이 나타나고, 케이블의 가격은 <표 2>와 같이 나타난다. <표 1>과 <표 2>로 부터  $W_B$ (원/AH)와  $W_C$ (원/mm<sup>2</sup>m)를 나타내면 (그림 4) 및 (그림 5)와 같다.

$W_E$ (원/kWh)는 현재 전화국의 전기요금 산출기준, 하절기 3개월(76.1원/kWh)과 나머지 9개월(52.6원/kWh)를 적용하면, 57.6원/kWh로 산출된다. 또한 (그림 4)와 (그림 5)에서 보면,  $W_C$ 는 30mm 이상에서 비교한 일정한 값을 나타내는 반면  $W_B$ 는 용량별로 변화가 심하므로 케이블은 30mm 이상만 사용되는 것으로 가정하고 평균치를 적용하면  $W_C$ 는 약 32.7원이 되고, 축전지 용량별 단가( $W_B$ ) 및 케이블의 거리(Dist)를 변수로 하여 식 (13)을 다시 표시하면 식 (14)와 같다.

$$Vd = \left( \frac{4 W_B + 558}{4 W_B + 558} \right)^{1/2} \times Dist \quad (14)$$

(그림 6)은 식 (14)에서  $W_B$ 를 평균값(170원)으로 하였을 때, 거리에 따른 전압강하를 나타낸다.

<표 1> 납축전지의 가격표

용량(AH)	가격(원/cell)
400	70,510
500	96,030
600	106,650
700	112,640
800	135,850
900	137,940
1000	210,760
1200	223,970
1400	258,610
1600	281,380
1800	312,180
2000	335,280
2200	345,220
2400	350,460
2800	482,570
3200	532,840
3600	587,950
4000	643,390
4400	680,900

<표 2> 케이블의 가격표

굵기(mm <sup>2</sup> )	가격(원/m)
2.0	140
3.5	194
5.5	263
8.0	374
14.0	559
22.0	792
30.0	1,001
38.0	1,240
50.0	1,707
60.0	2,036
80.0	2,618
100.0	3,317
125.0	4,074
150.0	4,985
200.0	6,390
250.0	8,191
325.0	10,339
400.0	12,766
500.0	15,558

### 4. 계산치의 비교

위의 결과를 확인하기 위하여 전압강하(Vd)에 따른 각 요소별 연간부자비의 변동을 살펴보면, 식 (7)-(10)으로부터 전류에 의해 정규화된 각 연간부자비는 다음 식 및 (그림 7)과 같이 나타난다. 여기서  $W_B = 170$ 원,  $W_C = 32.7$ 원,  $W_E = 57.6$ 원, 그리고 투프거리(Dist)는 50m의 경우로 하였다.

$$nA_B (= A_B/I) = 0.217 \times 18.75 \times 170 \times Vd$$

$$nA_C (= A_C/I) = (0.18 \times 0.018 \times Dist^2 \times 32.7)/Vd$$

$$nA_E (= A_E/I) = (24 \times 365 \times 57.6 \times Vd)/900$$

(그림 6)과 (그림 7)를 비교하여 보면 투프길이 50m에서 총연간부자비를 최소화할 수 있는 전압강하(Vd)는 0.46V로 일치함을 보여준다.

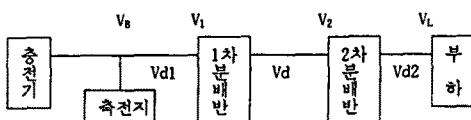
### IV. 결론

배전체통의 전압강하는 축전지, 케이블 및 전력손실 비용을 결합으로 최적의 전압강하를 설계하는 것이 중요하다. 따라서 본 고에서는 축전지 용량산출계수의 비선형 특성을 구간선형화 함으로써 축전지 용량, 배전 케이블의 길이 및 전력손실에 의한 연간투자 비용의 최소화를 기할 수 있는 최적의 전압강하치의 설계방안을 제시하였다.

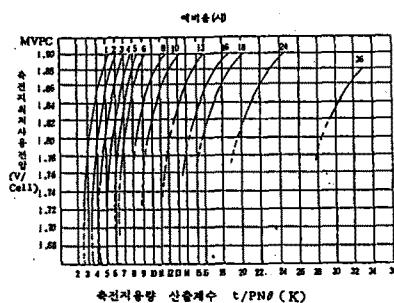
제시한 설계방법은 구간 선형화 과정에서 약간의 오차가 발생할 수 있고 투자설비의 비용에 기초한 것이므로 물가의 변동에 따라 유동적일 수 있다. 그러나 설계 선택되는 축전지와 케이블은 축전지 용량, 배전 케이블의 길이 및 차상위동균율 선택 하므로 물가의 급격한 변동이 없는 한 장적용이 가능할 것으로 기대된다.

#### [참고문헌]

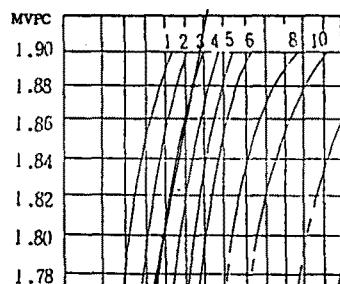
- [1] G.W. Smith, "Engineering Economy", 1979.
- [2] 한국통신, "전원시설 설계기준".
- [3] 한국물가정보(주), "종합물가정보", 1993.



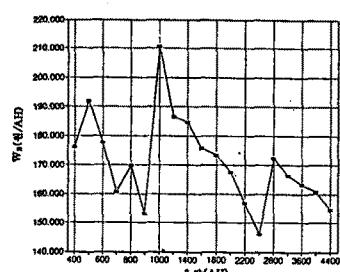
(그림 1) 측류전원공급시스템의 배전계통 모델



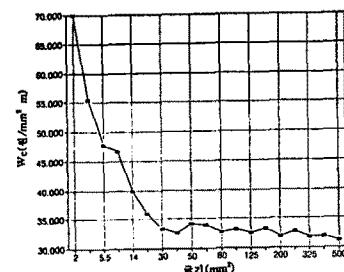
(그림 2) 축전지 용량산출계수 조건표(25도)



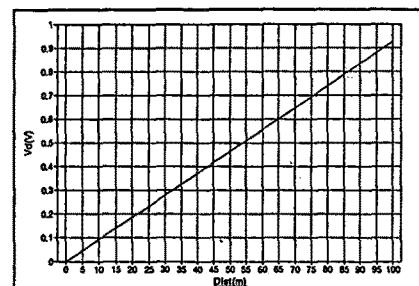
(그림 3) 축전지 용량산출계수 조건표의 구간 선형화



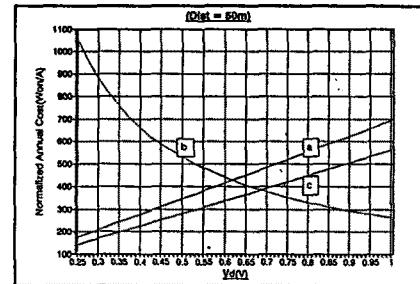
(그림 4) 축전지 용량에 따른  $W_B$  값



(그림 5) 케이블 굽기에 따른  $W_c$  값

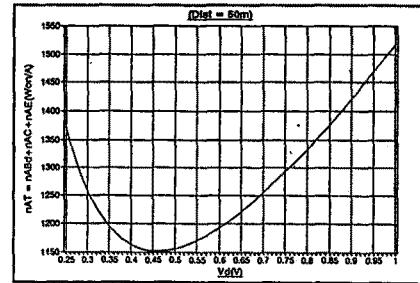


(그림 6) 거리에 따른 최적 전압강하



a: 축전지 비용  
b: 케이블 비용  
c: 전력손실 비용

(a)  $Vd$ 에 따른 축전지, 케이블 및 전력손실의 연간부자비용 변화



(b)  $Vd$ 에 따른 축전지비용의 변화

(그림 7)  $Vd$ 에 따른 연간부자비용의 변화