

## 분산전원이 연계된 배전계통의 손실 최소화 및 전압 profile 향상 방안

서재진, 김윤성, 원동준  
인하대학교 전기공학과

### Method of Loss Minimization and Voltage Profile improvement in Distribution System with Distributed Generator

Jae-Jin Seo, Yun-Seong Kim, Dong-Jun Won  
INHA University

**Abstract** - 에너지 효율이 강조되는 요즘, 전력계통의 손실을 최소화 시킬 수 있는 분산전원 최적 출력 운전은 에너지 효율 향상에 도움을 줄 것이다. 본 논문에서는 다수의 집중부하를 갖고 있는 방사형 배전계통에 분산전원이 연계됐을 때를 가정하였고 계통 해석을 위해 DistFlow 방법을 이용하여 계통의 조류계산을 하였다. 분산전원의 최적 출력식을 증명을 통해 도출하였고 시뮬레이션 프로그램 PSCAD /EMTDC으로 검증하여 보았다. 또한 최적 출력을 통해서 전압 profile이 향상되는 것을 볼 수 있었다.

### 1. 서 론

분산전원은 고압배전선로에 연결되어 전력을 공급해주는데 전력계통과 연계 운전함에 의해 보다 안정한 전원을 수요자에게 공급할 수 있고 잉여전력을 계통에 공급함으로써 다양한 에너지원의 효율적 활용도 가능하다는 이점이 있다.[1] 또한 분산전원은 전압 profile을 향상시키고 전력계통의 손실을 줄여주어 전체 계통 효율을 높여준다.

특히 1배럴당 200달러를 바라보는 요즘 같은 고유가 시대에 전력계통의 손실을 최소화 시킬 수 있는 분산전원 최적 출력 운전은 에너지 효율 향상에 도움을 줄 것이다.

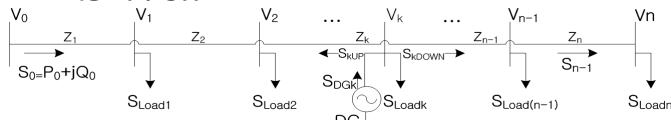
P. Chiradeja는 하나의 분산전원과 최하위단에 하나의 부하가 연계된 간단한 배전계통을 모델링하여 Case Study를 통해 선로 손실 감소에 대한 분석을 하였다. P. Chiradeja의 논문에서는 분산전원 상위단에 부하가 설치되지 않는 경우를 가정하여 분석하였고, 분산전원이 하위단의 부하들 모두에게 전력을 공급할 때 손실이 최소가 된다는 결과를 도출하였다.[2] 본 논문에서는 P. Chiradeja의 연구와 비교하여 <그림1>과 같이 분산전원 상/하위단 모두에 다수의 집중 부하가 있는 더욱 일반적인 배전계통을 대상으로 분산전원 최적 출력 방안을 도출하고 시뮬레이션 프로그램 PSCAD/EMTDC를 통해 검증해 보도록 하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 명칭

- $S_i, P_i, Q_i$  : 노드*i*에서 노드*i+1*로 공급되는 복소/유효/무효 전력
- $S_{DG}, P_{DG}, Q_{DG}$  : 분산전원에서 공급하는 복소/유효/무효전력
- $S_{loss1}, P_{loss1}, Q_{loss1}$  : 구간에서의 복소/유효/무효 전력 손실
- $V_i$  : 노드*i*의 전압
- $Z_i$  : 구간*i*의 선로 임피던스
- $I_i$  : 노드*i*에서 노드*i+1*로 공급되는 전류
- $I_{Loadi}$  : 노드*i*에 연결된 부하가 소비하는 전류
- $I_{DGk}$  : 노드*k*에 연계된 분산전원이 공급하는 전류

#### 2.2 계통 해석 방법



<그림 1> 방사형 배전계통

방사형 배전계통에서의 조류계산을 순차적으로 간단하게 구할 수 있는 DistFlow 방법을 이용하였다.[3]

변전소에서 배전계통으로 공급되는 복소전력  $S_0$ 을 알고 있는 경우 노드 1에서의 복소전력  $S_1$ 과 전압  $V_1$ 은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$S_1 = S_0 - S_{loss1} - S_{Load1} = S_0 - z|S_0|^2 / |V_0|^2 - S_{Load1}$$

$$V_1 = V_0 - z_1 I_0 = V_0 - z_1 S_0^* / V_0^* \tag{1}$$

순차적으로 나머지 노드에 대하여 적용하여 모든 노드에서의 전압 및 유효·무효전력 조류를 계산할 수 있으며 분산전원을 고려할 경우 다음과 같이 계산된다.[4]

$$\begin{aligned} P_{i+1} &= P_i - r_{i+1} (P_i^2 + Q_i^2) / |V_i|^2 - P_{Load(i+1)} + (P_{DGk}) \\ Q_{i+1} &= Q_i - x_{i+1} (P_i^2 + Q_i^2) / |V_i|^2 - Q_{Load(i+1)} + (Q_{DGk}) \\ |V_{i+1}|^2 &= |V_i|^2 - 2(r_{i+1} P_i + x_{i+1} Q_i) + (r_{i+1}^2 + x_{i+1}^2)(P_i^2 + Q_i^2) / |V_i|^2 \end{aligned} \tag{2}$$

또한 식 (2)에서 각 구간 손실은 다음과 같다는 것을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{lossi} &= r_{i+1} (P_i^2 + Q_i^2) / |V_i|^2 \\ Q_{lossi} &= x_{i+1} (P_i^2 + Q_i^2) / |V_i|^2 \end{aligned} \tag{3}$$

하지만 본 논문에서는 일반적으로 말하는 선로의 저항에 의한 열손실 (유효전력 손실)만을 고려하였다.

#### 2.3 제안한 방법

어느 한 구간의 유효전력 손실은 식 (3)과 같고, 각 구간의 손실들을 모두 더하여 전체 손실을 구하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} P_{totalloss} &= P_{loss1} + P_{loss2} + \dots + P_{lossn} \\ &= \frac{|S_0|^2}{|V_0|^2} r_1 + \frac{|S_1|^2}{|V_1|^2} r_2 + \dots + \frac{|S_{n-1}|^2}{|V_{n-1}|^2} r_n \\ &= |I_0|^2 r_1 + |I_1|^2 r_2 + \dots + |I_{n-1}|^2 r_n \end{aligned} \tag{4}$$

또한 각 구간에 흐르는 전류들은 키르히호프 전류 법칙(KCL)에 의해 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} |I_0| &= |I_{Load1}| + |I_{Load2}| + \dots + |I_{Loadk}| + \dots + |I_{Loadn}| - |I_{DGk}| \\ &\vdots \\ |I_{k-1}| &= |I_{Loadk}| + |I_{Load(k+1)}| + \dots + |I_{Loadn}| - |I_{DGk}| \\ |I_k| &= |I_{Load(k+1)}| + |I_{Load(k+2)}| + \dots + |I_{Loadn}| \\ &\vdots \\ |I_{n-1}| &= |I_{Loadn}| \end{aligned} \tag{5}$$

식 (4)와 식 (5)에서 유추할 수 있듯이 기본적으로 분산전원의 출력이 높을수록  $I_{DGk}$ 가 늘어나기 때문에 분산전원 상위 구간들에 흐르는 전류량이 줄어들어 배전계통의 손실이 줄어들게 된다. 그러나 분산전원의 출력이 최적 출력을 벗어나게 되면 오히려 전류의 양이 많아지게 되고 결국 손실이 증가하게 된다. 즉 분산전원 출력-배전계통 손실에 관한 그래프를 그리면 아래로 볼록한 포물선이 되고, 이 포물선의 꼭지점이 배전계통의 손실이 최소가 되는 지점이라 할 수 있다. 본 논문에서는 이 꼭지점에 해당하는 분산전원 출력 값을 찾는 방법을 다음과 같이 도출하였다.

식 (5)에서 볼 수 있듯이 분산전원이 설치된 노드 k 하위 구간에서 흐르는 전류는 분산전원 출력에 영향을 받지 않으므로 하위 구간의 손실은 분산전원의 출력과 무관하다. 따라서 상위 구간의 손실만을 고려하면 손실 최소화 방안을 찾을 수 있다. 또한 상위 구간의 손실을 감소시키기 위해서는 상위 구간 선로에 흐르는 전류량을 최소로 만들어 주어야 한다. 선로 거리와 선로 저항을 고려하여 분산전원에서 공급하는 전류 ( $I_{DGk}$ )를 적절하게 조정한다면 상위 구간 전류를 최소로 만들 수 있다.

### 2.3.1 Single 분산전원 최적 출력

노드 k 상위 구간의 유효전력 손실만을 정리하면 식 (6)과 같다.

$$P_{kUPtotalloss} = P_{loss1} + P_{loss2} + \dots + P_{lossk} \quad (6)$$

$$= \frac{|S_0|^2}{|V_0|^2} r_1 + \frac{|S_1|^2}{|V_1|^2} r_2 + \dots + \frac{|S_{k-1}|^2}{|V_{k-1}|^2} r_k$$

$$= |I_0|^2 r_1 + |I_1|^2 r_2 + \dots + |I_{k-1}|^2 r_k$$

식 (6)에 식 (5)를 대입하면 식 (7)과 같고, 다시 분산전원에서 공급하는 전류( $I_{DGk}$ )에 관한 이차함수 식으로 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$P_{kUPtotalloss} = |I_0|^2 r_1 + |I_1|^2 r_2 + \dots + |I_{n-1}|^2 r_n \quad (7)$$

$$= \left( \sum_{i=1}^n |I_{Loadi}| - |I_{DGk}| \right)^2 r_1 + \left( \sum_{i=2}^n |I_{Loadi}| - |I_{DGk}| \right)^2 r_2$$

$$+ \dots + \left( \sum_{i=k}^n |I_{Loadi}| - |I_{DGk}| \right)^2 r_k$$

$$P_{kUPtotalloss} = (r_1 + r_2 + \dots + r_k) |I_{DGk}|^2$$

$$- 2 \left\{ \sum_{i=1}^n |I_{Loadi}| r_1 + \sum_{i=2}^n |I_{Loadi}| r_2 + \dots + \sum_{i=k}^n |I_{Loadi}| r_k \right\} |I_{DGk}|$$

$$+ \left\{ \left( \sum_{i=1}^n |I_{Loadi}| \right)^2 r_1 + \left( \sum_{i=2}^n |I_{Loadi}| \right)^2 r_2 + \dots + \left( \sum_{i=k}^n |I_{Loadi}| \right)^2 r_k \right\} \quad (8)$$

이차함수가 최소(Minimum  $P_{kUPtotalloss}$ )일 때의  $Opt. |I_{DGk}|$ 을 구하면 식 (9)와 같다.

$$Opt. |I_{DGk}| = \frac{\sum_{i=1}^n |I_{Loadi}| r_1 + \sum_{i=2}^n |I_{Loadi}| r_2 + \dots + \sum_{i=k}^n |I_{Loadi}| r_k}{r_1 + r_2 + \dots + r_k} \quad (9)$$

그리고 이때의 분산전원 연계점 전압( $V_k$ )과  $Opt. |I_{DGk}|$ 을 곱하여 얻은 피상전력은 분산전원의 최적 출력 값( $Opt. |S_{DGk}|$ )이라 할 수 있다.

$$Opt. |S_{DGk}| = \frac{\sum_{i=1}^n |I_{Loadi}| r_1 + \sum_{i=2}^n |I_{Loadi}| r_2 + \dots + \sum_{i=k}^n |I_{Loadi}| r_k}{r_1 + r_2 + \dots + r_k} |V_k| \quad (10)$$

### 2.3.2 분산전원 출력 능력에 따른 구분

(i)  $Maximum |S_{DGk}| \leq Opt. |S_{DGk}|$  일 때는 분산전원의 출력이 최적 분산전원 출력에 도달할 수 없기 때문에 분산전원 최대 출력일 때 계통 손실이 최소가 된다.

$$New Opt. |S_{DGk}| = Maximum |S_{DGk}| \quad (10)$$

(ii)  $Maximum |S_{DGk}| \geq Opt. |S_{DGk}|$  일 때는 분산전원 출력이 앞에서 구한 최적 출력 값( $Opt. |S_{DGk}|$ )일 때 계통 손실이 최소가 되고 그 이상/이하 일수록 계통 손실이 늘어난다.

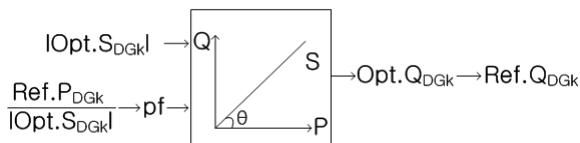
### 2.3.3 분산전원 출력 제어

위에서 구한 최적 피상전력을 통해 <그림 2>같이 원하는 분산전원 유효전력 출력 또는 역률을 정한다면 최적 무효전력 출력을 구할 수 있다.

$$Opt. I_{DGk} \times V_k = |Opt. S_{DGk}| \quad (18)$$

$$Opt. Q_{DGk} = |Opt. S_{DGk}| \cdot \sin(\cos^{-1} pf) \quad (19)$$

단,  $Ref. P_{DGk} \leq |Opt. S_{DGk}| \leq Maximum |S_{DGk}|$ 으로  $|Opt. S_{DGk}|$ 을 제한해준다.

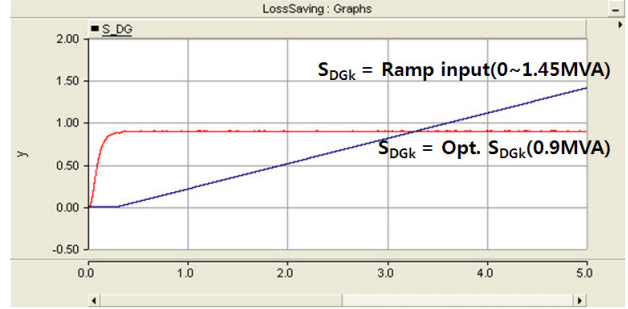


<그림 2> 최적 무효전력 도출 개념도

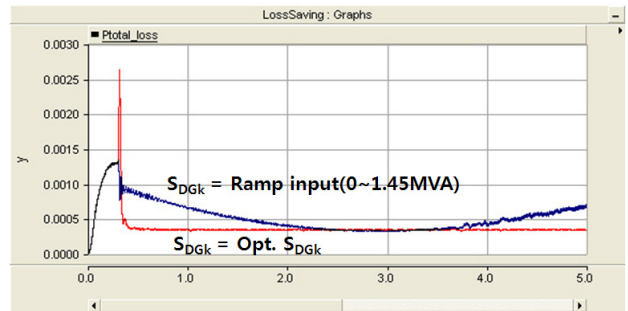
### 2.3.4 시뮬레이션 결과

위에서 구한 분산전원 최적 출력 방안을 검증하기 위해 전력시스템 시뮬레이션 프로그램 PSCAD/EMTDC를 사용하였다.

<그림 3>과 같이 분산전원의 출력을  $|Opt. S_{DGk}|$ 일 때와 ramp 입력일 때, 두 가지 경우의 손실을 비교하여보았다. 그 결과 <그림 4>에서 볼 수 있듯이 분산전원의 출력이  $|Opt. S_{DGk}|$ 일 때의 손실과 ramp 입력의 손실 최소점이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.



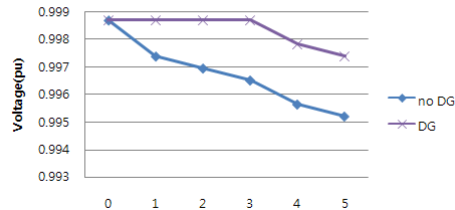
<그림 3> 분산전원 출력



<그림 4> 분산전원 출력에 따른 손실 비교

또한 <그림 5>와 같이 최적 출력을 통해서 배전계통의 전압 profile을 향상시킬 수 있다는 것을 볼 수 있다.

### Voltage Profile



<그림 5> 분산전원 유무에 따른 전압 profile

## 3. 결 론

본 논문에서는 배전계통의 손실을 최소화하기 위해 분산전원의 최적 출력식을 도출해 내었다. 또한 도출한 식을 시뮬레이션 프로그램 PSCAD /EMTDC를 통해 검증하였고, 전압 profile이 향상 된다는 것을 알 수 있었다.

앞으로 본 논문을 더 발전시켜 다수의 분산전원이 연계된 방사형 계통과 여러 개의 지선을 포함한 계통에서의 분산전원 최적 출력에 대해 연구하도록 하겠다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 대한전기학회, 최신 배전시스템공학, pp.488, 2006
- [2] P. Chiradeja, "Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Anlysis", IEEE/PES Trans. and Distribution Conferens & Exhibition, 2005
- [3] H. D. Chiang. and M. E. Baran. "On the Existence and Uniqueness of Load Flow Solution for Radial Dstribution Power Networks," IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. 37, No. 3, pp.410-416, March, 1990
- [4] 송현석, 김구호, "Fuzzy Goal Programming을 응용한 분산형전원의 설치 및 운영", Journal of KIEE, Vol. 18, No. 1, pp148, January 2004