

# FRIENDS(Flexible Reliable Intelligent Electrical eNergy Delivery System)를 이용한 배전계통의 효율적인 운용방안 개발

\*김용하, \*이형노, \*조재한, \*\*노대석, \*\*\*이 범, \*\*\*\*최상규  
\*인천대학교 전기공학과, \*\*한국전기연구소, \*\*\*여수대학교, \*\*\*\*안양과학대

## A study on the distribution system using Flexible Reliable Intelligent Electrical eNergy Delivery System

\*Inchon university, \*\*KERI, \*\*\*Yeosoo university, \*\*\*\*Anyang collage

**Abstract** This paper which can simulate FRIENDS(Flexible Reliable Intelligent Electrical eNergy Delivery System) model of distribution electrical system presents a new algorithm. In the operation of FRIENDS model, dispersed energy storage(DES) systems have an important role. We can use the active and reactive power of DES to control customer's voltage. In this, the former means load levelling operation and the later means voltage control operation of DES. We focus our research on load levelling operation of DES. We develop an algorithm to get an optimal capacity and operation schedule of DES and then apply it to the FRIENDS model. The results show the effectiveness of the proposed method.

력운송시스템인 FRIENDS를 이용한 배전계통의 기본적인 운용방안을 제안한다.

이때 FRIENDS내에서 분산형전원의 운용은 중요한 역할을 하게 되어 결국 분산형전원의 최적운용에 의하여 배전 전압을 고신뢰도로 유지할 수 있게 된다. 그러므로 본 연구에서는 분산형전원의 위치 및 용량을 결정할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며 이의 계산으로 산정된 결과를 FRIENDS모델에 적용하여 그 특성을 분석하였다. 본 연구의 분산형전원은 전지전력저장설비를 대상으로 하였다. 한편 제안한 모델을 시험계통에 적용하여 부하 평활화에 의한 전압제어의 측면에서 분산형전원을 운용하지 않은 경우의 모델과의 비교를 통하여 제안한 알고리즘의 특성을 분석하고 그 유용성을 검증하였다.

### 2. FRIENDS의 개요

FRIENDS의 실현형태로는 여러 가지의 형태가 고려될 수 있으나 부하집중지역인 도시를 고려하여 다음 그림 1.과 같은 형태를 고려한다.

### 1. 서 론

최근 전력수요는 급격히 증가하는 추세이고 전력공급 서비스는 생활수준 향상과 정보산업의 발전으로 보다 나은 양질의 전력이 요구되고 있다. 더욱이 환경오염에 대한 규제가 한층 강화되고, 발전소 건설 입지 난으로 인하여 대단위 규모의 전력공급시설의 건설이 어려워지고 있으며, 전력사업에서의 경쟁원리에 따른 규제완화가 광범위하게 전개되고 있는 추세이다. 그러므로 이와 같은 전력사업의 변화추세에 대처하기 위한 한 방법으로 민자발전소의 건설이 적극 검토되고 있으며 가스냉방, 열병합발전, 재생에너지를 이용한 발전 등의 확대경향과 아울러 에너지이용합리화의 측면에서 분산형 전원의 설치가 바람직하게 평가되고 있는 실정이다. 즉, 기동정지 및 부하추종 등의 운전특성이 우수하고 입지제한조건이 비교적 적은 소규모 분산형전원이 배전계통에 연계될 것으로 판단되고 있다. 이러한 경우 분산형전원은 종래의 기존 발전방식과는 달리 독립적인 상태에서 부하지역에 존재하게 되므로 전력계통에 연계되어 운전될 경우 각각의 분산형전원의 운용 특성으로 인하여 전력계통의 계획 및 운용은 현재와는 판이하게 상이해질 것이며, 특히 배전계통의 운용 및 계획은 질적으로 달라질 것으로 예견되고 있다. 그러므로 본 연구에서는 각기 다른 운용특성을 갖는 소규모 분산형전원이 배전계통에 연계시 발생할 수 있는 문제 즉, 급격한 부하변이, 계통보호, 전압제어 등을 해결하고자 소규모 분산전원 및 고압측과 저압배전선의 유연한 접속변경을 목적으로 한 Static Switch와 소규모 분산형전원으로 구성된 전력개질센터(QCC : Quality Control Center)를 통해 전력조류 및 전압을 제어하는 미래의 새로운 전

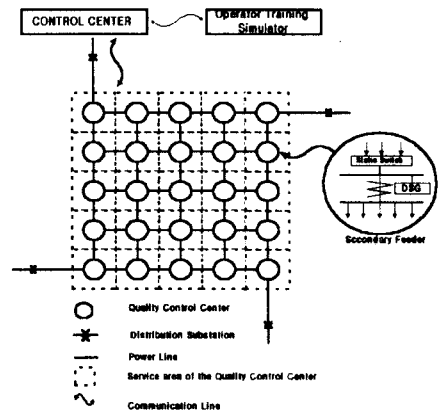


그림1. FRIENDS의 기본모형

그림 1.은 기존의 전력 네트워크를 기반으로 하여 각각의 전력공급지역내에 고신뢰성의 추구, 에너지이용효율의 극대화 및 부하평준화를 목적으로 한 분산형전원 및 고압측과 저압배전선의 유연한 접속변경을 목적으로 한 Static Switch등으로 구성된 전력개질센터(QCC)를 통해 전력조류 및 전압 등을 제어하여 고객에게 양질의 전기뿐만 아니라 다양한 품질의 전력을 제공하는 등의 다양한 서비스를 제공할 수 있는 FRIENDS의 기본 모델을 나타낸 것이다.

### 3. 정식화

배전선로의 부하는 중부하시와 경부하시 크게 변하므로 주변압기 1차측의 무부하시 탭변경장치, 부하시 탭 절환장치(ULTC) 등을 이용하여 규정전압을 유지하고 있다. 배전변전소에서의 송출 전압을 제어하기 위하여 널리 사용되고 있는 LRT(Load Ratio Transformer)를 이용한 LDC(Line Drop Compensation)방식은 그림 2와 같다.

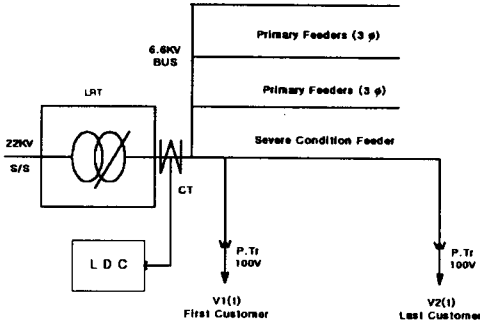


그림 2 LRT를 이용한 LDC방식

#### 3.1 분산형 전원의 적정용량 산정

분산형전원의 적정용량을 결정하기 위한 전제 조건은 다음으로 하였다.

- ① 분산전원의 운전은 정출력운전이다
- ② 충전시간이 결정되어 있고 부하평활화 지표는 부하율이다
- ③ 분산전원의 충방전효율은 분산전원의 에너지수위의 1차 함수로 고려하였다.
- ④ 충전 및 방전을 고려하여 부하율이 1이 되는 부하의 평균치를 계산의 기준치로 하였다.

구체적인 계산절차는 다음과 같다.

##### [step1] 부하기준치의 산정

배전계통의 부하의 평균치(MEAN<sub>0</sub>)를 초기치로 하여 부하를 가장 평활화시키는 부하의 크기(MEAN<sub>ref</sub>)를 구한다.

$$MEAN_{ref} = MEAN_0 + \Delta MEAN * K \quad (1)$$

$$E_C = \sum_{i=1}^{NLD} (MEAN_{ref} - X_i) \quad (X_i < MEAN_{ref}) \quad (2)$$

$$E_D = \sum_{i=1}^{NLD} (X_i - MEAN_{ref}) \quad (X_i \geq MEAN_{ref}) \quad (3)$$

$$\eta_C = A_C * \frac{(2E_0 + E_C)}{2} + B_C \quad (4)$$

$$\eta_D = A_C * \frac{(2E_0 + 2E_C - E_D)}{2} + B_C \quad (5)$$

- 단, MEAN<sub>0</sub> : 부하의 초기평균치  
 MEAN<sub>ref</sub> : 부하를 완전히 평활화시키는 부하의 크기  
 ΔMEAN : MEAN<sub>ref</sub>를 구하기 위한 증가량  
 NLD : 계통부하수

- X<sub>i</sub> : 시간대 부하  
 A<sub>C</sub>, B<sub>C</sub>, A<sub>D</sub>, B<sub>D</sub> : 충방전시의 충방전효율함수  
 E<sub>0</sub> : 분산전원 초기에너지  
 η<sub>C</sub>, η<sub>D</sub> : 충방전효율

충방전효율을 고려한 충전에너지(E<sub>C</sub>)와 방전에너지(E<sub>D</sub>)를 식(2) 및 식(3)으로 계산하여 두 양이 같아질 때까지 식(1)에서 식(5)을 반복하여 부하기준치(MEAN<sub>ref</sub>)를 산정하였다.

##### [step2] 방전시간 산정

충전용량, 에너지 및 효율을 다음식으로 구하였다.

$$CCAP_C = MEAN_{ref} - X_{HC} \quad (6)$$

$$ENERGY_C = CCAP_C * HC \quad (7)$$

$$\eta_C = A_C * \frac{(2E_0 + ENERGY_C)}{2} + B_C \quad (8)$$

분산형전원의 방전으로 인한 가능한 에너지수위의 감소는 방전에너지가 충전에너지 보다 작은 범위내에서 ΔENERGY<sub>D</sub> 간격으로 식(9)로써 계산하였으며 이에 대한 방전효율 및 방전에너지를 식(10), 식(11)로 구한다.

$$LEVEL_D = E_0 - \Delta ENERGY_D * n \quad (9)$$

$$\eta_D = A_D * (E_0 + ENERGY_C - \frac{LEVEL_D}{2} + B_D) \quad (10)$$

$$ENERGY_D = LEVEL_D * \eta_C * \eta_D \quad (11)$$

단, HC : 충전시간

X<sub>HC</sub> : 작은부하에서 HC번째 부하의 크기

LEVEL<sub>D</sub> : 에너지 수위감소

n : 반복횟수

CCAP<sub>C</sub> : 충전용량

ENERGY<sub>C</sub> : 충전에너지

ENERGY<sub>D</sub> : 방전에너지

충전용량은 MEAN<sub>ref</sub>보다 작은 부하에 대하여 충전시간대의 그 크기가 HC번째 되는 부하와 MEAN<sub>ref</sub>의 차로 결정하고 방전용량은 방전가능에너지를 MEAN<sub>ref</sub>보다 큰 부하에 대하여 방전에너지 크기가 가장 큰 1개의 부하가 모두 담당하는 경우에서 MEAN<sub>ref</sub>보다 큰 부하 모두가 담당하는 경우까지 방전시켜보고 그 결과가 MEAN<sub>ref</sub>보다 작아지지 않은 가능한 해 집합 중 부하율이 가장 큰 경우일 때 방전시간 및 방전용량으로 결정한다

본 연구에서는 분산형 위치는 부하평활화 효과를 고려하여 각 node에서의 부하곡선과 전체 부하곡선이 유사한 형태를 갖는 node에 두도록 하였다.

#### 3.2 LRT의 최적송출전압 산정

배전변전소에서 LDC 방식을 이용한 최적송출전압의 결정 문제는 가능한 많은 수용가에게 가장 적당한 전압을 공급할 수 있는 LDC setting값을 찾는 것이다. 우선 LRT의 최적보상비로 표현되는 공급전압을 결정하고 전부하전류와의 관계를 고려한 LDC 최적 setting값을 계산하여 최적 송출전압을 얻을 수 있다.

**[step1] LRT의 최적보상비**

배전변전소에서의 공급전압은 여러 개의 primary feeder를 가지는 LRT에 의하여 조정된다. 그러므로 다음 식(12)와 같은 최적화문제 제로 정식화시킬 수 있다

$$Min J(t) = [V_{max}(t) - V_1(t) * (\frac{X_{mtr}}{R_{mtr}})]^2 \quad (12)$$

$$+ [V_1(t) * \frac{X_{mtr}}{R_{mtr}} - V_{min}(t)]^2$$

Sub. to  $V_{max}(t) = V_{max}$

$$V_{min}(t) = V_{min} * \frac{V_1(t)}{V_2(t)}$$

- 단, J(t) : time interval에서의 최적합수
- $V_{max}(t), V_{min}(t)$  : 허용전압의 상·하한치
- $V_1(t), V_2(t)$  : LRT측 직하 및 말단전압
- $V_{1max}(t)$  : LRT측 직하 수용가에서의 최대 전압보상치
- $V_{1min}(t)$  : LRT측 말단 수용가에서의 최소 전압보상치
- $R_{mtr}$  : LRT의 전압보상비
- $X_{mtr}$  : LRT의 최적전압보상비

최적전압보상비는 목적함수 J(t)의 최소화시의  $X_{mtr}$ 로서 식(13)으로 구해진다.

$$X_{mtr} = R_{mtr} * \frac{(V_{1max}(t) + V_{1min}(t))}{2V_1(t)} \quad (13)$$

**[step2] LDC의 최적 setting값**

step1에서  $X_{mtr}$ 에 의하여 계산된 송출전압 $V_s(t)$ 를 이용하여 LDC의 최적setting치는 식(14)로서 구해진다.

$$Min q = \sum_{i=1}^T [V_s(t) - V_{ce} - Z_{eq} * I_0(t)]^2 \quad (14)$$

- 단,  $V_{ce}(t)$  : 부하중간 전압
- $Z_{eq}(t)$  : 등가 임피던스
- $I_0(t)$  : LRT의 총부하전류

본 연구에서는 식(14)의 해를 Least square method를 이용하여 식(15) 및 식(16)으로 구하였다.

$$Z_{eq} = \frac{[\sum_{i=1}^T I_0(t) * \sum_{i=1}^T V_s(t) - \sum_{i=1}^T I_0(t) * V_s(t)]}{(\sum_{i=1}^T I_0(t))^2 - \sum_{i=1}^T (I_0(t))^2} \quad (15)$$

$$V_{ce} = \frac{[\sum_{i=1}^T I_0(t) - Z_{eq} \sum_{i=1}^T ((I_0(t))^2)]}{\sum_{i=1}^T I_0(t)} \quad (16)$$

그러므로 식(15) 및 식(16)을 이용하여 최적송출전압은 식(17)로 구해진다.

$$V_{op}(t) = V_{ce} + Z_{eq} * I_0(t) \quad (17)$$

**3.3 평가지수**

전압분산전원의 운용에 따라 배전계통의 수용가 전압의 규정전압에 대한 근사도를 식(18)과 같은 수용가 전압과 규정전압과의 제곱 차이로 계산해 보았다.

$$DV(t) = \sum_{k=1}^K [(V_1(t, k) - V_{st})^2 + (V_{st} - V_2(t, k))^2] \quad (18)$$

단, DV : 시간대별 규정전압과의 차

K : 총 NODE수

$V_{st}$  : 규정전압(101V)

$V_1(t, k)$  : 각 node에서의 변대직하 전압

$V_2(t, k)$  : 각 node에서의 말단전압

한편, 배전계통에서 시간대별 구간별 1차 간선에서의 전압강하는 식(19)로 계산하였다.

$$VD(t, k) = K * I(t, k) (R \cos\theta + X \sin\theta) * L(k) \quad (19)$$

단, VD(t,k) : 각 구간별 전압강하

K : 계수(0.866)

I(t,k) : 각 구간별 입력전류

L(k) : 구간별 간선의 길이(km)

**4. 사례연구**

FRIENDS의 운영결과를 검토하기 위해 분산형전원의 운용을 하지 않은 경우를 사례 1로 하고 분산형전원의 운용을 한 경우를 사례 2로 하여 그 결과를 평가지수를 이용하여 비교하였다.

**4.1 계통자료**

본 연구의 각 구간별 1차 배전선로의 구간 자료는 표 1과 같으며 그림 3은 4개의 배전변전소로부터 전력을 공급받고 있는 FRIENDS 모델이다.

간선의 부하 pattern은 주택밀집, 공단, 상가 및 주택 혼용 등으로 가정하였으며 전체 부하커브곡선과 일치하는 node 5, 7, 8 에 적정용량의 분산형전원을 선정하였고, 변압기, 2차 배전선, LEAD선 각각의 전압강하는 2.0V, 4.0V, 2.0V 로 가정하였다.

표 1 Section Data for Primary Feeder

Feeder No.	Node No.	Path		Impedance		Length (Km)	Pole Tr.Tap	Load (P+JQ)
		From	To	R(Ω/Km)	X(Ω/Km)			
1	1	0	1	0.313	0.338	0.8	6750/105	1.35+0.65
	2	1	2	0.313	0.338	1.0	6600/105	1.35+0.65
	3	2	3	0.502	0.354	0.7	6600/105	1.35+0.65
	4	3	4	0.502	0.354	0.6	6600/105	1.35+0.65
2	5	0	5	0.313	0.338	1.0	6750/105	1.68+0.33
	6	5	6	0.313	0.338	0.8	6750/105	1.35+0.65
3	7	0	7	0.313	0.338	1.0	6750/105	0.68+0.33
	8	7	8	0.313	0.338	0.7	6750/105	1.35+0.65
	9	8	9	0.313	0.338	0.8	6600/105	1.35+0.65
4	10	0	10	0.313	0.338	0.8	6750/105	1.35+0.65
	11	10	11	0.313	0.338	0.7	6600/105	1.35+0.65

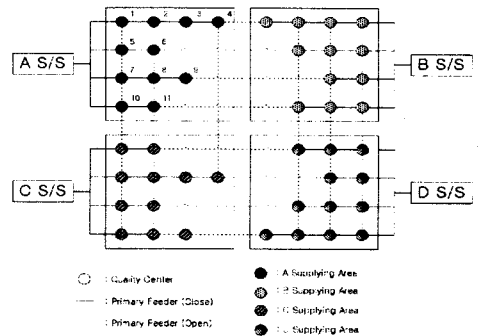


그림 3 Model system

## 4.2 적용결과

우선 본 연구에서 제안한 분산형전원의 적정용량 산정에 의한 분산형전원의 운전으로 부하가 평활화된 모습을 나타낸 결과가 그림 4와 같다.

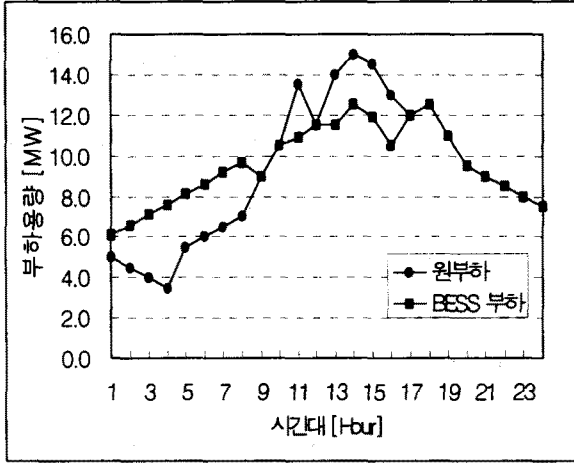


그림 4 분산형전원의 부하평활화 결과

분산형전원의 용량은 2.7[MW]로 산정되었으며, 그림 4와 같이 첨두부하 시간대에서 5시간동안 방전을 하고 기전부하 시간대에서 8시간을 충전함으로써 부하를 평활화시키고 있음을 알 수 있다. 분산형전원을 운전하기 전의 부하율은 0.61이었으나 분산형전원의 운전 후 부하율은 0.77로 산정되어 분산형전원의 운전으로 약 20[%]정도 부하의 개선효과가 있음을 알 수 있다.

이때 분산형전원의 용량이 커지면 커질수록 부하의 개선효과는 더욱 증가될 것이나 이에 대한 문제는 경제성 및 신뢰성을 바탕으로 신중히 검토될 문제로 사료된다.

한편 분산형전원을 투입하지 않은 경우(사례 1)와 투입한 경우(사례 2)의 평가지수를 식(18)로 계산한 결과가 그림 5와 같다.

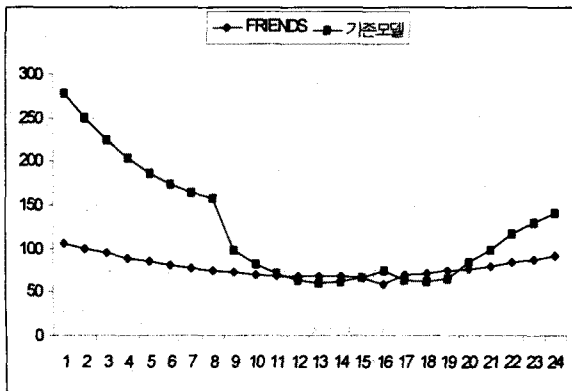


그림 5 사례1과 사례2의 평가지수

그림 5에서 사례 2의 경우가 사례 1에 비하여 전체 시간대에 있어서 전압이 규정치에 가까운 값으로 운전되고 있음을 알 수 있다. 각 node에서의 전압은 모두 규정치 내에서 운전되고 있음을 추정할 수 있다. 이는 분산형전원의 운전으로 부하가 평활화되어 Primary Feeder에서 Node까지의 전압강하분이 감소하는 현상에서 비롯되고 있다.

## 5. 결론

본 연구는 결과를 간단히 요약하면 다음과 같다.

- (1) 분산형전원의 가변효율을 고려하여 예측된 부하를 가장 평활화 시키는 분산형전원의 적정용량을 산정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.
- (2) 미래의 새로운 전력운송시스템인 FRIENDS의 운용을 통해 부하평활화가 전압제어에 미치는 효과를 산정할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며,
- (3) 제안한 알고리즘을 기존의 방식과 정량적인 지수로서 비교하여 제안한 알고리즘의 유용성을 검증하였다.
- (4) 분산형전원의 운용에 의한 부하평활화측면에서의 FRIENDS의 효과에 국한시켜 본 연구를 수행하였으나 향후 분산형전원의 무효전력제어에 의한 수용가의 전압제어와 다양한 형태의 분산형전원의 특성을 모두 고려할 수 있는 보다 일반적인 알고리즘의 개발 및 FRIENDS의 다른 부가적인 특성을 검토할 수 있는 심도 있는 연구가 필요하다 하겠다.

## 6. 참고문헌

- [1] K. Yasuda, K. Nishiya, J. Hasegawa and R. Yokoyama : "Optimal Generation Expansion Planning with Electric Energy Storage Systems", Proc. of the IECON '88 14th Annual conference of IEEE Industrial Society, (1988)
- [2] Vasilije P. Lulic " Optimal Operation Policy for Energy Storage", IEEE trans. PAS-101. No. 9(1982)
- [3] H. Kirkham and R. as : "Effect of Control in Utility Interactive Dispersed Storage Generation System", IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, No. 8, 1984
- [4] C. hen : "The Effect of Control to Efficient and Operation of Electric Distribution Systems", Ph. Thesis, University of Texas at Arllington(1982)
- [5] David I-ho Sun : "Distribution Systems Loss Analysis and Optimal Planning", Ph. Thesis, University of Texas at Arllington, 1982.
- [6] 노대석외, "차세대 배전계통 운용체계와 자율분산 제어기술", 대한전기학회지, 10월, 1997년.