

## 열병합 발전설비의 배전계통 연계시 전압변동에 관한 연구

\* 최준호\*, 김두봉\*, 김재철\*, 황치우\*\*

\*: 송실대학교 전기공학과

\*\* : 한국 전기연구소

### Study on The Voltage Variation in Power Distribution Systems Including Cogeneration Facilities.

\* Joon-Ho Choi\*, Du-Bong Kim\*, Jae-Chul Kim\*, Chi-Woo Hwang\*\*

\*: DEPT. of Electrical Engineering Soongsil University \*\* : KERI

**Abstract** - This Paper deals with voltage variation and voltage regulation method in power distribution systems including cogeneration facilities. In order to deliver suitable voltages to many customers at the distribution substations. In this paper, an on-line real time modified voltage regulation method is proposed. The result from a case study show that the proposed method can be practical tool for the voltage regulation in distribution systems including cogeneration facilities.

및 최적 송출전압을 연구하였고, D.S.Rho et al[4].은 인공신경망의 BP(back propagation)학습 알고리즘을 사용한 최적 송출전압을 연구하였다.

하지만 이러한 연구에서는 배전용변전소(이하 BANK)의 피더간 부하패턴의 불균형은 고려하지 않았다. 본 논문에서는 기존의 배전계통의 주변압기에 대부분 채용되는 ULTC(Under Load Tap Changer)와 COGN을 P-Q지정 노드 모델을 사용하여 배전계통의 피더간 부하패턴의 불균형시의 COGN의 연계에 따른 상시 전압변동(steady state voltage variation)을 시뮬레이션하였고, 개선된 LDC전압 조정 방식(MLDC:Modified Line Drop Compensation)을 제시하였다.

#### 1. 서 론

최근 지구환경문제, 에너지 자원 고갈 및 발전소 부지확보난으로 인해 태양광발전, 연료전지발전, 풍력발전, 열병합발전, 전지저장장치등과 같은 분산형전원(DSG:Dispersed Storage and Generation)에 대한 관심이 고조되고 있다. 이러한 분산형전원 중 열병합발전설비(cogeneration facilities; 이하 COGN)는 열에너지 및 전기에너지를 동시에 사용함으로써 종합 에너지 이용효율이 상당히 높다. 하지만 이러한 설비의 배전계통의 분산배치에 따라 전력계통운용에 영향을 미치게되며, 이러한 문제로는 전압변동, 보호협조, 고조파, 배전계통 구성 및 설계 변화, 단락용량 증가등의 문제가 발생한다.

본 논문에서는 이러한 연계문제중 전압변동과 이에따른 전압조정에 관해 연구하고자 한다. 이와 관련된 연구로는 Kirkham et al[1].은 DSG모델을 동기기, 유도기, DC/AC 인버터등으로 이의 지정노드를 P-V노드로 하여 전압 변동을 시뮬레이션하였고, Ishikawa et al[2].은 DSG모델을 일정출력의 P-Q지정노드로 하여 DSG의 출력과 선로의 전압 Profile을 연구하였고, J.E.Kim et al[3].은 기존 배전계통의 전압 조정방식인 LDC(line drop compensation)방식을 고려하여 분산형 전원의 연계와 송출전압 변동의 관계를 고려하여 도입한계량

#### 2. 본 론

본 절에서는 배전계통 모델 및 기존의 전압조정 방식인 LDC방식 및 현재 대부분의 배전변전소의 주변압기에 채용되는 ULTC 및 COGN을 모델링하고 또한 배전계통의 피더간 부하패턴 불균형을( $F_{UR}$ )을 정의 한다.

##### 2.1 LDC 방식에서의 송출전압

LDC전압조정방식은 대부분의 배전용변전소에서 널리 쓰이는 전압조정방식으로 부하중심점의 전압을 일정하게 유지하는 방식이다.이러한 LDC전압조정방식에서의 송출전압은 다음의 (1)식처럼 간략화하여 표현할수있다.[3-5,8]

$$V_{spo}(t) = V_0 + Z_{eq} \times I(t) \quad (1)$$

여기에서,  $V_{spo}(t)$  : 시각t에서의 송출전압

$V_0$  : LDC 기준전압

$Z_{eq}$  : LDC회로의 선로등가 임피던스

$I(t)$  : 시각t에서의 부하전류

## 2.2 배전계통 모델

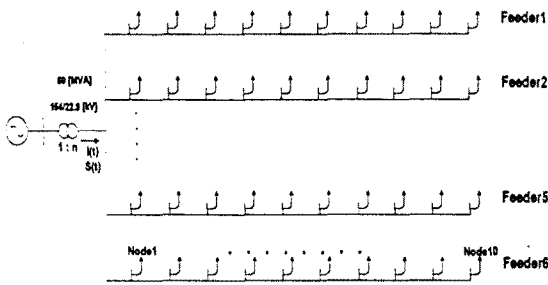


그림 1 배전계통 모델

그림1의 배전계통 모델에 대해 사용된 파라미터는 다음의 표1과 같다.

표 1 배전계통 모델 파라미터

	기준 용량 [MVA]	100
	기준 전압 [kV]	22.9
변전소	주변압기 임피던스 [p.u.]	0.04+j0.15
	주변압기 정격용량 [MVA]	60
선로	선로 임피던스 [p.u./km]	0.0347+j0.0746
	피더 수 [개]	6
	피더당 노드 수 [개]	10
	노드 간격 [km]	1
중부하시	노드당 부하 [p.u.]	0.01 (지상역율 0.9)
	전압 강하 [%]	주상변압기 : 2 저압배전선 : 7
	고압배전선 전압강하[%]	3.5
경부하시	노드당 부하 [p.u.]	0.0025 (지상역율 0.9)
	전압 강하 [%]	중부하시의 1/4
	고압배전선 전압강하[%]	중부하시의 1/4
변압기	주상변압기 탭비	22900/380
	ULTC 탭간 간격[p.u.]	0.01

그림1과 같은 배전계통 모델에서의 최대송출전압 ( $V_{spo, max}$ ) 및 최소송출전압 ( $V_{spo, min}$ )은 일반적으로 다음의 식으로 결정할 수 있다. [3,8]

$$V_{spo, max} = \frac{V_{Dh}}{2} + (V_{Dptr} + V_{DI} + V_0)N \quad (2)$$

$$V_{spo, min} = \frac{V_{Dh}}{2n} + \left[ \left( \frac{V_{Dptr} + V_{DI}}{n} \right) + V_0 \right] N \quad (3)$$

여기에서,  $V_{Dh}$  : 중부하시 고압배전선의 평균전압강하,  $V_{Dptr}$  : 중부하시 주상변압기의 평균전압강하,  $V_{DI}$  : 중부하시 저압선로의 평균전압강하,  $N$  : 주상변압기의 탭비,  $V_0$  : 기준전압,  $n$  : 중부하시와 경부하시의 부하전류의 비율이다.

## 2.3 COGN 모델

현재 계통에 연계되는 일반적인 COGN은 일정역율 및 계통전압과 동일하게 유지되도록 운전하고 있으므로 COGN의 모델은 그림2와 같이 배전계통과의 접속노드를 P-Q노드로 설정할 수 있다.

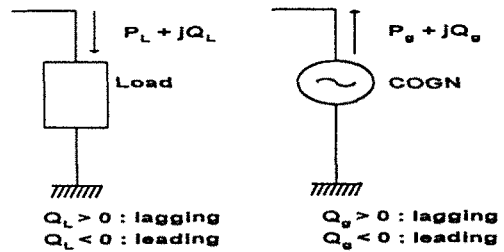


그림 2 부하와 COGN의 지상, 진상 정의

## 2.4 ULTC 모델

LDC방식을 채용하는 ULTC의 탭은 0.01[p.u.]의 전압불감대와 탭 변환시 60초의 지연시간을 가지며, 제어 블럭선도는 다음의 그림3과 같다. [6]

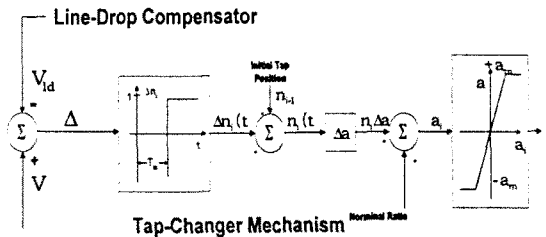


그림 3 ULTC 제어 블럭선도

## 2.5 부하패턴 불균형을

피더간 부하패턴이 균형일경우와 부하패턴이 불균형일경우의 전압조정면에서의 피더간 부하패턴 불균형을 ( $F_{UR}$ )은 다음의 (4), (5)식으로 정의할 수 있다.

$$F_{UR} = \text{Max} K \left[ \left| \frac{F_{Smax} - F_{Smean}}{F_{Smean}} \right|, \left| \frac{F_{Smean} - F_{Smin}}{F_{Smean}} \right| \right] \quad (4)$$

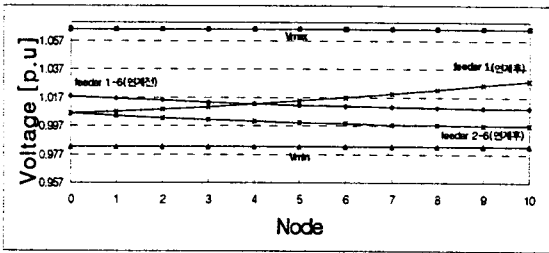
$$K = \left( 2 - \frac{F_{Stol}}{S_{bank}} \right) \left( \frac{F_{Smax}}{F_{Smin}} \right) \quad (5)$$

여기에서,  $F_{Smean}$  : 각 피더 부하의 평균,  $F_{Smax}$  : 최고

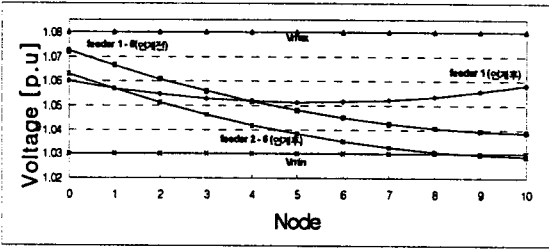
부하 피더,  $F_{Smin}$  : 최저부하 피더,  $F_{Slot}$  : 각피더 부하의 합계,  $S_{bank}$  : BANK 정격용량,  $K$  : 보정계수이다.

### 3. 배전계통 전압profile

본논문에서는 배전계통의 전압profile을 계산하기 위해 Distflow branch 조류계산법[7]을 사용하였으며 균형부하시와 불균형부하시( $F_{UR} = 3.21$ )의 그림1의 배전계통 모델에 COGN(충격: 0.1[p.u.], 역율 1)이 피더1의 노드10번에 연계되었을 경우와 연계전의 각 피더의 전압profile을 그림4,5에 나타내었다.



(가) 경부하시



(나) 중부하시

그림 4 균형부하시 feeder의 전압profile

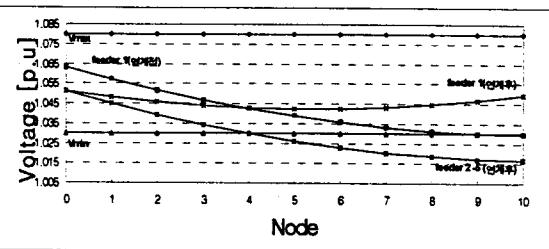
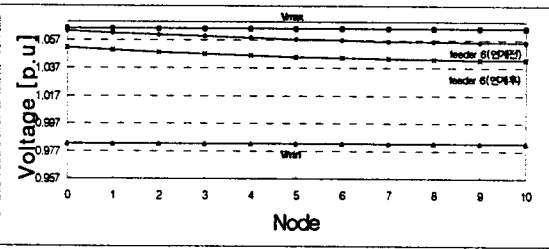


그림 5 불균형부하시 feeder의 전압profile

그림4의 (가)는 각피더의 부하가 경부하시이고,

(나)는 각피더의 부하가 중부하시일 때 COGN의 연계에 따른 전압profile이며, 그림5의 부하패턴 불균형율( $F_{UR}$ )은 3.21 이고 각 피더의 구성은 피더 1~5는 중부하시, 피더6은 경부하시일 때 COGN의 연계에 따른 전압profile이며,  $V_{max}$  : 허용 전압 범위의 상한치,  $V_{min}$  : 허용 전압범위의 하한치이다.

시뮬레이션의 결과에서 알 수 있듯이 COGN의 연계에 따라 (1)식의 송출전압이 저하함을 알수있었고, 또한 부하균형일 때보다는 부하불균형일 때의 수용가 단자전압은 허용범위를 이탈함을 알수있었다. 따라서 기존의 LDC전압조정방식으로는 배전계통에 분산배치되어 있는 COGN의 불규칙한 운전에 따른 전압변동에 대처할 능력이 없다고 보여지므로 새로운 전압조정방식이 요구된다.

### 4. 개선된 전압조정방식(MLDC)

기존의 LDC 전압조정 방식은 LDC내부정정계수를 고정하는 Off-line방식이며, 이러한 전압조정 방식으로는 COGN의 불규칙한 운전에 대해 수용가의 전압을 허용유지 범위내로 유지하기 힘들다. 본 논문에서는 그림6과 같은 LDC내부회로의 선로등가임피던스  $Z_{eq}$  를 변경하지않고 그림3의 ULTC 제어 블럭 선도에서 기준전압 ( $V_0$ )을 변경하는 On-line MLDC 전압조정 방식을 제안하며 이의 최적 송출전압결정식은 다음의 (6)~(8)식과같이 표기할 수 있다.

$$V_{op}(t) = V_0(t) + Z_{eq} \times I(t) \quad (6)$$

$$I(t) = \sum_{i=1}^R (I_{F,i}(t)) \quad (7)$$

$$I_{F,i}(t) = (I_{F,i}(t) + I_{Co,i}(t)), \quad i=1, 2, \dots, R(8)$$

여기에서,  $V_{op}(t)$  : 최적송출전압,  $V_0(t)$  : 최적 기준전압,  $I(t)$  : COGN을 고려한 부하전류 이다.

(6)식에서의 최적 송출전압의 문제는 (9)식의 평가함수를 사용한 (10)~(12)식의 최적화 문제로 볼 수 있다.

$$J(t) = \sum_{i=1}^R [V_{op}(t) - V_{m,i}(t)]^2 \quad (9)$$

$$\text{Min } J(t) \quad (10)$$

$$\text{s.t. } V_{op}(t) - V_{Dmax} \geq V(t)_{\min, \max} \quad (11)$$

$$V_{op}(t) \leq V(t)_{\max, \min} \quad (12)$$

여기에서,  $V_{Dmax}$  : 각피더의 전압강하중 최대치,  $V(t)_{\min, \max}$  : 각피더의 허용 전압최소치중 최대치,  $V(t)_{\max, \min}$  : 각피더의 허용 전압최대치중 최

소치,  $V_{m,i}(t)$ : 각 피더의 부하중심점 전압,  $P$ : 피더의 수이다.

제안한 MLDC 전압조정방식을 사용하여 전 절에서 상정한 부하패턴 불균형율과 동일한 배전계통을 대상으로 각 피더의 전압profile을 그림 7에 나타내었다. 시뮬레이션의 결과에서 알 수 있듯이 각피더의 전압은 허용유지범위내에 있음을 알 수 있다.

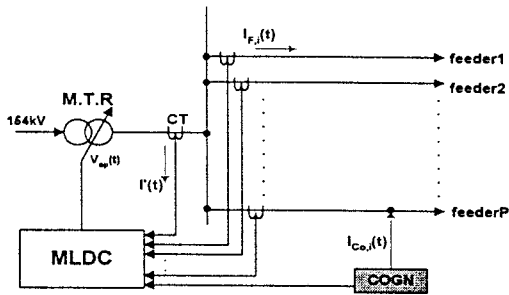


그림 6 MLDC 전압조정 방식의 개념

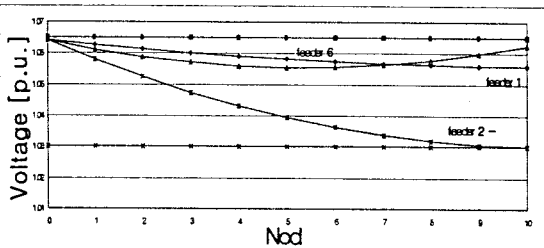


그림 7 MLDC 전압조정방식을 적용한 배전계통의 전압profile

## 5. 결 론

본 논문에서는 열병합발전설비의 배전계통 연계시의 전압변동 및 전압조정방식에 대하여 연구하였다. 또한 배전 계통의 피더간 부하패턴 불균형율 ( $F_{UR}$ )을 정의 하였고, 이를 사용하여 배전계통 및 COGN연계시의 전압변동을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션의 결과 기존의 전압조정방식인 LDC전압 조정방식은 COGN의 불규칙적인 운전에 의한 전압 조정능력이 없는 것으로 보인다. 따라서 본 논문에서는 새로운 전압조정방식인 MLDC 전압 조정방식을 제안하였고, 이를 배전계통 모델에 적용하여 시뮬레이션한 결과 만족스러운 전압조정을 행한다는 것을 알 수 있었다. 하지만 부하패턴 불균형율 ( $F_{UR}$ )이 매우 심한 경우에는 제안된 방식으로도 전압조정이 어려울것으로 사료된다. 향후에 COGN 및 DSG의 배전계통의 분산배치에 따른 배전계통 재구성(network reconfiguration) 및 SVC와의 협조 운전등의 연구가 진행된다면 배전계통 자동화 및 최적화에 도움이 되리라 사료된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] H.Kirkham and R.Das, "Effects of Voltage Control in Utility Interactive Dispersed Storage and Generation Systems", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.8, pp 2277-2282, Aug. 1984
- [2] T.Ishikawa et al, "Analysis of Voltage Variation in Distribution line according to inverse power flow of DSG", 1994 National Conventional Record I.E.E. Japan, pp. 12-161, 12-162, Mar. 1994
- [3] J.E.Kim et al, "Impacts of Dispersed Storage and Generation on the sending-end Voltage in A Distribution Substation and A method of Their Introduction Limits", Proc. of ICEE, Session PS II-2, OB-19, pp. 89-92, Taejon, Korea, 1995
- [4] D.S.Rho et al, "Voltage Regulation Methods Based on an Extended Approach and Neural Networks for Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems", Transaction of IEE of Japan, Vol. 117 B, No.3, Mar. 1997
- [5] Turan Gonen, Electric Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill series in electrical engineering, McGraw-Hill, New York, 1986
- [6] M.S.Calovic, " Modeling and Alalysis of Under Load Tap Changing Transformer Control Systems", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.7, pp 1909-1915, July. 1984
- [7] M.E.Baran, F.F.Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction And Load Balancing", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.4, No.2, April. 1989
- [8] 김재철, 최준호, 김두봉, 소형 열병합 발전설비의 계통연계시 전압변동에 관한 연구, 통상 산업부, 1997. 3