

# 분산형전원이 연계된 배전계통의 전압조정에 관한 연구

°최준호\*    추동욱\*    김재철\*    황치우\*\*  
 \* : 숭실대학교 전기공학과    \*\* : 한국 전기 연구소

## Voltage Regulation Method at the Power Distribution System interconnected with DSG System

°Joon-Ho Choi\*    Dong-wook Chu\*    Jae-Chul Kim\*    Chi-woo Hwang\*\*  
 \* : Dept. of Elec. Engineering, Soongsil Univ.    \*\* : Korea Electric Research Institute

### Abstract

This paper deals with voltage regulation at the power Distribution system interconnected with DSG. Modern distribution substation adopt LDC method as the voltage regulation method to deliver suitable voltages to many customers. However, the operations of DSG interconnected with distribution system, the customers' voltage vioate the permissible voltage limits. Therefore, to deliver suitable voltage to many customers at the distribution substation, an advanced voltage regulation method is required. In this paper, the on line realtime MLDC (Multiple Line Drop Compensation) method, considered daedband and hysterical tap changing of the ULTC, is proposed. The result from a simulation study shows that the proposed method can be practical applications for the voltage regulation at the distribution system interconnected with DSG and unbalanced load pattern among feeders.

의 하였다. 제안한 MLDC 전압조정방식은 피더간 부하 패턴의 불균형이 심한 배전계통 및 분산형전원의 연계시의 전압조정에서 그 유용성이 모 의 시뮬레이션 결과 입증 되었다.

### 2. 시스템 모델

#### 2.1 배전계통 모델

배전계통 모델은 그림1과 같으며, 배전계통 모델에 대한 파라미터는 표 1과 같다.

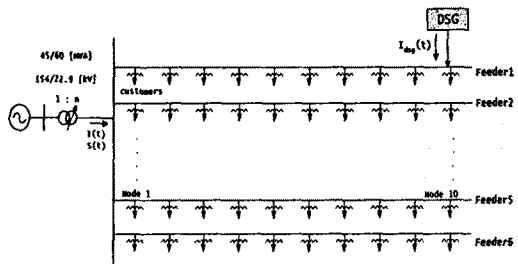


그림 1 배전계통 모델

### 1. 서 론

최근 지구환경문제, 에너지 자원 고갈 및 발전소부지확보난으로 인해 태양광발전, 연료전지발전, 풍력발전, 열병합발전, 전지저장장치 등과 같은 분산형전원(DSG : Dispersed Storage and Generation)에 대한 관심이 고조되고 있다. 하지만 이러한 설비의 배전계통의 분산 배치에 따라 전력계통 운용에 영향을 미치게되며, 이러한 문제로는 전압변동 및 조정, 보호협조, 고조파, 배전계통 구성 및 설계 변화, 단락용량 증가등의 문제가 발생한다.

표 1 배전계통 모델 파라미터

구분	기준 배이스	100 [MVA]
배전용 변전소	기준 전압	22.9 [kV]
	임피던스(45[MVA])	0.0042+j0.15 [p.u.]
	정격용량	45/60 [MVA]
주변압기	ULTC 탭간 간격	0.0125 [p.u.]
	노드당 부하	0.0347+j0.0746 [p.u./km]
선로	피더 수	6
	피더당 노드수	10
	노드 간격	1 [km]
	노드당 부하	0.01 [p.u.] (lagging power factor 0.9)
중부하시	전압 강하	LV distribution line : 6 [%] Pole transformer : 3 [%]
	노드당 부하	0.0025 [p.u.] (lagging power factor 0.9)
경부하시	전압 강하	LV distribution line : 1.5 [%] Pole transformer : 0.75 [%]

본 논문에서는 이러한 계통 연계문제중 전압변동과 이에 따른 전압조정 에 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, J.E.Kim et al.[2]은 기존 배전계통의 전압 조정방식인 LDC(Line drop compensation)방식하에서 분산형 전원의 연계와 송출전압 변동의 관계를 고려하여 도입한계량 및 최적 송출전압을 연구하였고, D.S.Rho et al.[3]은 통계적 분석을 통한 LDC전압 조정방식과 인공신경망의 BP(back propagation)학습 알고리즘을 사용한 최적 송출전압을 연구하였다. 하지만 이러한 연구에서는 배전용 변전소의 피더간 부하패턴의 불균형, ULTC의 dead band 및 이의 hysterical한 탭 동작은 고려하지 않았다.

#### 2.2 ULTC 모델

LDC방식을 채용하는 ULTC 변압기의 탭의 위치는 수용기의 단자전압을 전압 허용범위내로 조정하기 위해 이산적으로 변화한다. 이러한 ULTC변압기의 제어는 다음의 식(1)-(5)으로 표현 할 수 있으며 이의 예를 그림2에 나타내었다.[4,5]

본 논문에서는 이러한 요소를 고려한 On-line real time MLDC(Multiple Line Drop Compensation)전압조정방식을 제

$$T_k(t+1) = T_k(t) - a_k f_k(e_k(t), c_k(t)) \quad (1)$$

$$c_k(t+1) = g_k(e_k(t), T_k(t)) \quad (2)$$

$$f_k(e_k, c_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } e_k = 1 \text{ and } c_k > dt \\ -1 & \text{if } e_k = -1 \text{ and } c_k < dt \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$g_k(e_k, c_k) = \begin{cases} c_k + 1 & \text{if } e_k = 1 \text{ and } c_k \geq 0 \\ c_k - 1 & \text{if } e_k = -1 \text{ and } c_k \leq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$e_k(\Delta V_k, db) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta V_k > db \\ -1 & \text{if } \Delta V_k < -db \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기에서,  $k=1, 2, \dots, K$ ,  $K$ : ULTC의 총 탭수,  $T_k(t)$ : 시간  $t$ 에서의 ULTC 탭 위치,  $\Delta V_k(t)$ : 전압 차:  $V_r - V_k$ ,  $c_k(t)$ : 시간  $t$ 에서의 전압조정 릴레이의 카운터,  $a_k$ : ULTC의 탭간 간격,  $db$ : ULTC의 전압불림대,  $dt$ : ULTC의 시간 지연치

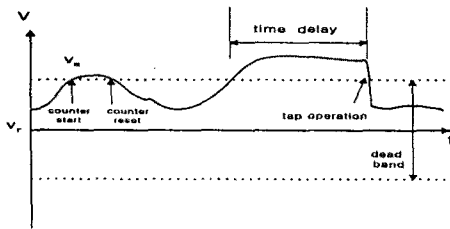


그림 2 ULTC 제어의 예

즉, ULTC의 탭은 전압 아래  $\Delta V_k(t)$ 가 전압불림대  $db$ 를 시간 지연  $dt$  동안 이탈 할 때 한 탭씩 상향으로 이동하여 수송가 전압을 유지하도록 한다.

### 2.3 부하 및 DSG 모델

현재 계통에 연계되는 대부분의 DSG는 AVR를 갖추고 있다. 따라서 일직선을 및 계통전압과 동일하게 운전하고 있으므로 DSG의 모델은 그림2와 같이 배전계통과의 접속노드를 P-Q노드로 설정할 수 있다.

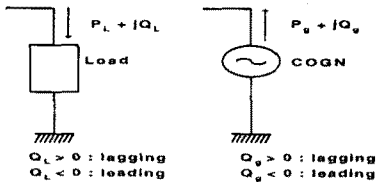


그림 3 부하와 DSG의 지상, 전상 정의

### 3. LDC전압 조정방식

LDC전압조정방식은 대부분의 배전용변전소에서 널리 쓰이는 전압조정 방식으로 부하중심점의 전압을 일정하게 유지하는 방식이다. 이러한 LDC전압 조정 방식에서의 송출기준전압과 송출전압은 다음의 식 (6), (7)와 같이 정의 된다. [2-3, 7]

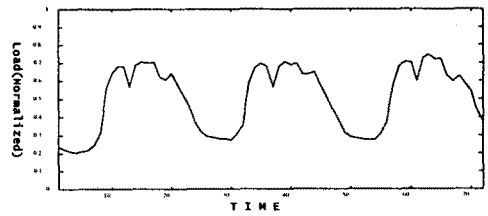
$$V_{ser}(t) = V_{ce} + Z_{eq} \times I(t) \quad (6)$$

$$V_{se}(t) = V_{tap,k}(t) - Z_{MTR,k}(t) \times I(t) \quad (7)$$

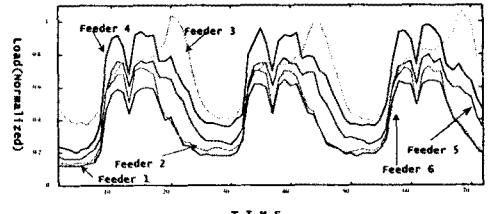
여기에서,  $k=1, 2, \dots, K$ ,  $k$ : ULTC 탭수,  $V_{ser}(t)$ : 송출 기준 전압,  $V_{se}(t)$ : 송출 전압,  $V_{ce}$ ,  $Z_{eq}$ : LDC 상수,  $V_{tap,k}(t)$ : ULTC 탭이  $k$ 번째 위치 할 때의 전압,  $Z_{MTR,k}(t)$ : ULTC 탭이  $k$ 번째 위치 할 때의 주변임피던스,  $I(t)$ : 부하 전류.

### 4. 배전계통 전압 profile

부하형 전원의 배전계통 연계에 따른 전압 변동을 시뮬레이션 하기 위한 부하 곡선은 그림4와 같으며, 상정한 부하곡선은 연간 데이터 중 피더간 부하 패턴의 불균형이 가장 심한 하계 B.배전 변전소의 실제 운전 데이터로부터 상정하였다. 그림5는 기존의 LDC방식 전압 조정방식 하에서의 각 피더의 최고 전압 수용가와 최저 전압 수용가 전압의 profile이며, 그림6은 DSG의 출력이 5[MVA]이고 전력의 소비가 가장 많은 피더3의 노드5번에 연계되었을때의 수용가 전압 profile이다. 시뮬레이션의 결과에서 알 수 있듯이 DSG의 연계에 따라 (6)의 송출 기준전압이 저하되고 이에 따라 (7)의 송출전압이 저하되어 부하형 전원이 연계되지 않은 이웃 피더의 수용가 전압이 연계전보다 낮아질 수 있었다. 따라서 기존의 LDC전압조정방식은 모선에서 부하로 유입되는 부하전류로만 전압조정을 행하므로 배전계통에 분산배치되어 있는 DSG의 불규칙한 운전에 따른 전압변동에 대처할 능력이 없다고 보며, 또한 피더간 부하 패턴의 불균형이 심한 배전에서의 전압 조정은 힘들다고 보여진다.



(가) 뱅크 전체 부하 곡선



(나) 피더별 부하 곡선

그림 4 상정한 부하 곡선

그림4(가)의 Y축은 60[MVA], (나)의 Y축은 10[MVA]를 기준으로 Normalized 한 값이다.

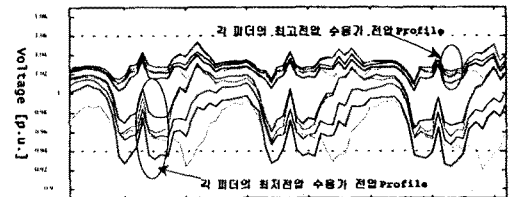


그림 5 수용가 전압 profile(DSG연계전)

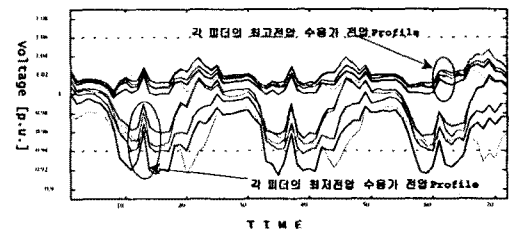


그림 6 수용가 전압 profile(DSG 연계후)

## 5. On-line real time MLDC전압 조정방식

현재 대부분의 배전용 변전소의 각 피더에는 CT(Current transformer)가 장착되어 있으며, 또한 이의 데이터를 기록 하고 있다. 하지만 이를 전압조정에 적극적으로 활용하지 않는 실정이다. 본 논문에서는 향후 DSG의 배전계통 연계, 피더간 부하 패턴의 불균형 및 ULTC 탭 동작의 히스테리직인 요소를 고려한 on-line real time MLDC전압 조정방식을 제안하며 이는 다음의 (8)식으로 표현 할 수 있다. 즉, 식(8)에서부터 최적출입에 대한 ULTC의 최적 탭을 얻을 수 있으며 이에 대한 ULTC 제어는 식(9)로서 표현 된다.

$$\text{Min } J = \sum_{n=1}^N \{ (V_{\max} - V_{n,\max})^2 + (V_{\min} - V_{n,\min})^2 \} \quad (8)$$

Subject to,

$$V_{n,\min} \geq V_{\min}$$

$$V_{n,\max} \leq V_{\max}$$

$$V_{n,\max} = \text{Max} [F(V_{se})]$$

$$V_{n,\min} = \text{Min} [F(V_{se})]$$

$$V_{se} = V_{\text{tap},k} - Z_{\text{tra},k} \times I$$

여기에서, N: 피더수,  $v'_{n,\max}$ : 피더n에서의 최고 전압 수용기 전압,  $v'_{n,\min}$ : 피더n에서의 최저 전압 수용기 전압,  $V_{\max}$ : 허용 전압 유지 범위의 상한치,  $V_{\min}$ : 허용 전압 유지 범위의 하한치,  $F(x)$ : 조류개선 함수 [6].

$$e_k(T_k(t), T_k(t-1)) = \begin{cases} e_k = 1 & \text{if } T_k(t) > T_k(t-1) \\ e_k = -1 & \text{if } T_k(t) < T_k(t-1) \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

본 논문에서 제안한 MLDC전압 조정 방식의 알고리즘은 다음과 같다.

- [1] 시간 t에서, 각 피더의 전류, 모선 전압, DSG의 출력으로부터 조류개선을 실시하여 각 피더의 유출 및 유입전력, 수용기 전압들 계산한다. 또한 (8)식의 최적화 문제로부터 수용기 전압을 허용조압범위내로 유지하는 최적 출출전압에 대한 최적 탭  $T_k(t)$ 을 찾는다.
- [2]  $T_k(t)$ 와  $T_k(t-1)$ 를 비교하여 이에 맞는  $e_k(t)$ 를 계산한다.
- [3]  $t=t+1$ , [1]의 계산을 반복한다.

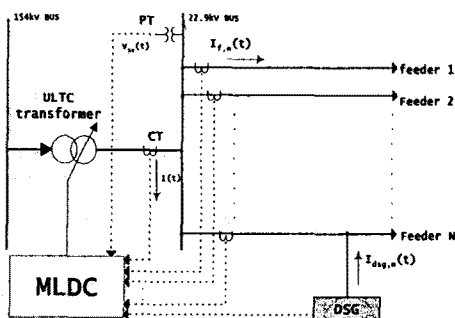


그림 7 MLDC 전압조정 방식의 개념

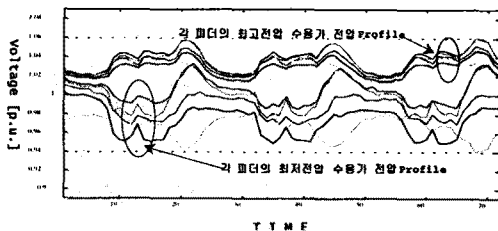


그림 8 MLDC에의한 수용기 전압 profile(DSG 연계전)

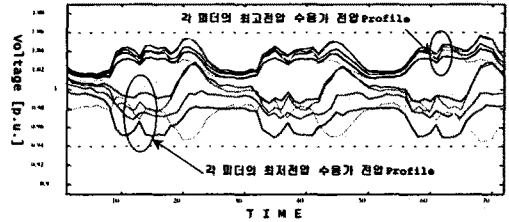


그림 9 MLDC에의한 수용기 전압 profile(DSG 연계후)

그림8,9에서 일수 있듯이 제안한 MLDC전압 조정방식은 DSG의 연계 및 피더간 부하 패턴의 불균형이 존재하는 배전계통에서 수용기 전압을 전압 허용 유지 범위내로 조정함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 DGS의 연계에 따른 수용기 전압변동의 영향을 실제 배전 변전소의 운전 데이터로부터 상정한 부하 곡선으로 모의 시뮬레이션 하였다. 제안한 MLDC전압 조정방식은 DSG의 연계 및 피더간 부하 패턴의 불균형이 존재하는 배전계통에서의 전압 조정에서 이의 유용성이 모의 시뮬레이션 결과 입증 되었다. 하지만 On-line 전압조정으로 인해 기존 방식보다 많은 탭 동작횟수를 가진다. 향후 분산형전원의 배전계통에의 분산배치에 따른 배전계통 재구성 및 이의 운전역율에 따른 시스템 전압안정도 및 탭 동작 횟수 개선을 위한 ULTC와 SVC(Static Var Compensator)의 협조 운전에 관한 연구가 진행 된다면 배전 자동화 및 최적화에 유용한 자료가 되리라 사료 된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] H.Kirkham and R.Das, "Effects of voltage Control in utility Interactive Dispersed Storage and Generation Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No.8, pp. 2277-2282, August 1984.
- [2] 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 PS11-2*, 08-19, pp. 89-92, Taejon, Korea, July 1995.
- [3] D.S.Rho et al, "Voltage Regulation Methods Based on an Extended Approach and Neural Network for Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems", *Transaction of IEE of Japan*, Vol.117 B, No.3, Mar. 1997.
- [4] Turan Gonen, *Electric Power Distribution System Engineering*, McGraw-Hill series in electrical engineering, McGraw-Hill, NewYork, 1986.
- [5] M.S.Calovic, " Modeling and Analysis of Under Load Tap Changing Transformer Control Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No.7, pp. 1909-1915, July 1984.
- [6] M.E.Baran, F.F.Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction And Load Balancing", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.4, No.2, pp. 1401-1407, April 1989.
- [7] 김재철, 최준호, 김두봉, 소현, *올바른 발전설비의 계통연계시 전압변동에 관한 연구, 한양 전기 연구소, 1997년*