

배전계통의 전압조정기 운영방법에 따른 분산형전원 최대 도입 용량 산출

논 문
58-7-2

The Maximum Installable DG Capacity According to Operation Methods of Voltage Regulator in Distribution Systems

김 미 영[†]
(Miyoung Kim)

Abstract - Stable and sustainable power supply means maintaining a certain level of power quality and service while securing energy resource and resolving environmental issues. Distributed generation (DG) has become an essential and indispensable element from environmental and energy security perspectives. It is known that voltage violation is the most important constraint for load variation and the maximum allowable DG. In distribution system, sending voltage from distribution substation is regulated by ULTC (Under Load Tap Changer) designed to maintain a predetermined voltage level. ULTC is controlled by LDC (Line Drop Compensation) method compensating line voltage drop for a varying load, and the sending voltage of ULTC calls for LDC parameters. The consequence is that the feasible LDC parameters considering variation of load and DG output are necessary. In this paper, we design each LDC parameters determining the sending voltage that can satisfy voltage level, decrease ULTC tap movement numbers, or increase DG introduction. Moreover, the maximum installable DG capacity based on each LDC parameters is estimated.

Key Words : Distributed Generations(DG), Voltage Regulation, Under Load Tap Changer(ULTC), Line Voltage Compensation(LDC), LDC Parameters(load center voltage, equivalent impedance)

1. 서 론

최근 전 세계적 화두는 부하증가와 환경문제이다. 부하증가에 대한 안정적 전력공급과 화석연료 사용에 의한 환경문제의 대안으로써 분산형전원(Distributed generation, DG)에 대한 관심이 높아지고 있다. DG는 대규모 집중화된 기존 전원과 달리 수요측 가깝게 설치될 수 있는 소규모 전원을 의미한다. DG는 경제적·효율적 이유로 단독으로 수용가에 전력을 공급하는 것이 아니라, 기존 전력계통과 연계해 운용되고 있다. 이때 여러 가지 기술적 문제들(고장전류 증가, 선로 허용전류 초과, 전압문제, 더욱 복잡한 보호제어등)이 발생하며,^[1-3] 특히 태양광이나 풍력과 같은 재생에너지를 이용한 DG의 불확실하며 빈번한 출력변동은 배전계통의 전압조정을 어렵게 만든다. 이들 DG 연계 문제를 해결하기 위해 단기적으로는 선로중설, 전압조정기 추가, 정전압 주상변압기의 사용 등의 설비보강이 예상되며, 장기적으로 마이크로그리드 등의 새로운 전력계통 구축이 제시되고 있다.

DG는 민간 발전사업자에 의해 설치되지만, 전력회사는 전력계통의 안정한 운용을 위해 DG 도입 규모(설치위치와 설치용량)를 제한한다(fit&forget criterion). 그러므로 전력회사와 민간 발전사업자의 원활한 협의를 위해 기존 전력계통의 설비상황과 운용 하에서 도입될 수 있는 DG 규모는 정

확히 산정되어야 한다. 더욱이 DG 연계 문제에 대한 대책들의 도입 시점을 결정하기 위해서도 기존 전력계통의 DG 수용 한계를 명확히 하여야 하고, 그 한계를 결정하는 중요한 기술적 척도 중의 하나가 배전계통의 전압 문제이다.

일반적으로 배전계통의 전압문제 해결책으로써 무효전력 보상(reactive power compensation), 탭 전환 변압기(tap-changing transformers), 무효전력 공급(reactive power generation) 등의 방법이 이용되고 있다. 탭 전환 변압기에 의한 방법은 변압기 1차측과 2차측의 무효전력을 제어함으로써 2차측 전압을 조정하는데, 배전용변전소의 부하시 탭 변환기(Under Load Tap Changer, ULTC)와 배전선로상의 선로전압조정기(Step Voltage Regulator, SVR)가 대표적이다. 특히 송출전압을 조정하는 ULTC는 전체 수용가 전압을 담당하고 대전력을 조정하기 때문에 다른 어느 장치보다도 배전계통에 큰 영향을 미친다. ULTC는 부하변동에 따른 배전선로상 전압강하를 보상하는 선로전압강하보상법(Line Drop Compensation, LDC)에 의해 조정된다.^[4] LDC 전압조정방안에서, ULTC의 송출전압은 측정된 뱅크전류와 미리 설정된 LDC 정정치(LDC parameters, 부하중심점 전압과 등가 임피던스)를 이용해 결정된다. 그리고 어떤 LDC 정정치를 사용하는가에 따라 배전계통 운용상에 여러 가지 양상을 나타내며, 도입될 수 있는 DG 규모에도 많은 영향을 미친다. 어떤 LDC 정정치는 수용가 전압을 표준전압(220(V))에 근접하게 유지하거나, ULTC 탭 동작횟수를 줄이거나, 배전손실을 줄인다. 특히 DG가 연결된 배전계통에 있어서 DG 도입을 고려하지 않은 LDC 정정치를 그대로 적용하면 전압문제가 발생할 수 있으며, DG 도입을 증진시키는 LDC

[†] 교신저자, 정회원 : 한국기술대학교 · 공박

E-mail : fssp@kut.ac.kr

접수일자 : 2009년 3월 4일

최종완료 : 2009년 6월 2일

정정치를 고려해야 한다. 즉 배전계통의 운용목적에 따라 서로 다른 LDC 정정치를 적용할 필요가 있다.

본 논문에서는 배전계통 운용 목적에 따른 적정 LDC 정정치를 설계하며, 이에 기반한 최대 도입 가능한 DG 용량을 산정한다. 구체적으로 설명하면, 2장에서는 LDC 전압조정방안과 배전계통의 전압 관련 제약조건에 대해 언급하고, 3장에서는 불감대폭(deadband)과 이산적(discrete) ULTC 탭 운용을 고려한 실행 가능한 LDC 정정치 설계 방법을 제시하고, 4장에서는 각 목적(수용가 전압의 안정성, 탭 동작횟수 감소, DG 도입 증가)에 따른 LDC 정정치의 설계 방법을 설명한다. 5장에서는 모델 배전계통 시뮬레이션을 통하여 본 연구에서 제안한 설계방법의 유효성을 확인하고 도입 가능한 최대 DG 용량을 단독노드와 다수노드에 대하여 산정한다.

2. 배전계통 전압조정

송전계통을 따라 흐른 전력은 배전용변전소의 주변압기(M.tr)를 통해 배전계통의 각 수용가에 공급된다. 이때 주변압기에 설치되어 있는 ULTC는 다수의 탭을 가지고 운용되는 전압 조정기인데, 수용가 전압이 적정 범위 내에 유지되도록 탭 송출전압을 조정하는 역할을 한다. 또한 ULTC는 역조류에 의한 전압상승을 유발하는 DG 도입에도 큰 영향을 미친다. 즉, 부하가 증가하거나 DG 출력이 작을 때 송출전압을 상승시키고, 반대로 부하가 감소하거나 DG 출력이 클 때 송출전압을 강하시킨다.^[5] 이 ULTC를 조정하는 가장 일반적인 방법이 LDC 전압조정법이다.

2.1 LDC 전압조정법

그림 1은 LDC 전압조정법의 개념을 설명하는데, 부하변동(bottom time부터 peak time까지)에 대하여 계통내의 어떤 지점의 전압을 일정(V_{ce})하게 유지하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 일정지점까지의 임피던스(Z_{eq})에 의하여 발생하는 전압강하를 보상하며, 그 보상된 송출전압은 다음식과 같다.

$$V_{send}(t) = V_0 \times Xmtr(t) = V_{ce} + Z_{eq} \times I_{Bank}(t) \times Xmtr(t) \quad (1)$$

여기서, t : 시간대, $V_{send}(t)$: 송출전압, V_0 : 기준전압 (1.0(p.u.)), $Xmtr(t)$: V_0 에 대한 전압보상율, $I_{Bank}(t)$: 측정된 탭 전류, V_{ce} 와 Z_{eq} : LDC 정정치(부하 중심점 전압, 등가 임피던스)

2.2 배전계통의 운용제한

알려진 것처럼, 전력계통은 어떤 상황에서도 만족되어야만 하는 몇몇 제약 조건들(탭 역조류 금지, 선로 허용전류 초과 금지, 적정 수용가 전압 유지, ULTC 운용범위 유지)을 가지고 있다. 더욱이 도입 가능한 DG 용량은 반드시 이들 제약조건 하에서 산정되어야만 한다. 본 논문은 전압에 관련된 다음 두 가지 제약조건들을 고려한다.

적정수용가 전압

$$\underline{V}(t,k) \leq V(t,k) \leq \overline{V}(t,k) \quad (2)$$

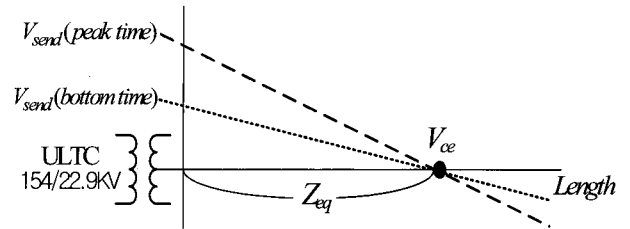


그림 1 LDC 전압조정법의 개념
Fig 1 Concept of LDC Method

ULTC 운용 범위

$$0.9 \leq V_{send}(t) \leq 1.1(\text{p.u.}) \quad (3)$$

여기서, k : 노드번호, $V(t,k)$, $\underline{V}(t,k)$, $\overline{V}(t,k)$: 시간 t 에서의 노드 k 의 고압측 전압, 그리고 수용가 전압을 만족하는 하한치와 상한치

3. LDC 정정치 설계^[6]

부하변동에 따른 ULTC의 송출전압은 미리 설정된 LDC 정정치를 식 (1)과 같이 이용해 산출된 송출전압에 대하여, 불감대폭을 고려하여 이산적으로 운용된다. 즉, LDC 전압조정법에 의한 송출전압 결정문제는 각 수용가의 전압이 합리적 분포가 되도록 LDC 정정치를 먼저 설계하는 것이다. 구체적으로 설명하면, 부하변동에 대하여 2.2절의 제약조건을 만족하는 송출전압을 산정하고, 불감대폭을 고려하여 이용 가능한 송출전압(continuous)을 결정하고 식 (1)의 송출전압과 탭전류와의 선형 관계식을 이용하여 실행 가능한 LDC 정정치의 범위를 결정한다.

3.1 송출전압의 산정

ULTC 송출전압은 모든 노드의 수용가 전압을 허용범위 이내로 유지하는 것이 목표인데, 부하에 의해 발생하는 저압측(Low voltage side) 전압강하를 보상하는 고압측(High voltage side) 전압을 유지시켜준다. 주상변압기 직하 수용가(v1)까지의 전압강하는 주상변압기(V_{sf})와 인입선(V_{sl})에서 발생하고, 말단 수용가(v2)까지의 전압강하는 주상변압기, 저압선로(V_{sf}), 인입선에서 발생한다. 그러므로 각 노드의 모든 수용가 전압을 만족시키는 고압측 전압은 다음과 같다.

$$\overline{V}(t,k) = ptap_k \left(v1 + \Delta v1 \times \frac{L(t,k)}{L_{max}} \right) \quad (4)$$

$$\underline{V}(t,k) = ptap_k \left(v2 + \Delta v2 \times \frac{L(t,k)}{L_{max}} \right) \quad (5)$$

여기서, $ptap_k$: 노드 k 의 주상변압기 탭 비율, $v1$ 과 $v2$: 각 노드의 주상변압기 직하와 말단 수용가 전압의 허용범위 (233, 207(V)), $\Delta v1(=V_{tr}+V_{sl})$ 과 $\Delta v2(=V_{tr}+V_{sf}+V_{sl})$: 변압기 직하와 말단 수용가까지의 전압강하분(피크부하시= L_{max}), $L(t,k)$: 시간 t 에서의 노드 k 의 부하

각 노드의 저압측 전압강하를 고려한 고압측 전압 (4)와 (5)를 유지하는 식 (1)의 전압보상율 $Xmtr(t,k)$ 의 상한치

$(\overline{Xmtr}(t,k))$ 와 하한치($\underline{Xmtr}(t,k)$)를 산정하는데, 송출전압과 각 노드까지의 고압측 전압강하와의 역관계를 이용한다.

$$V_0 \times \overline{Xmtr}(t,k) - \frac{\Delta V(t,k)}{\underline{Xmtr}(t,k)} = \overline{V}(t,k) \quad (6)$$

$$V_0 \times \underline{Xmtr}(t,k) - \frac{\Delta V(t,k)}{\overline{Xmtr}(t,k)} = \underline{V}(t,k) \quad (7)$$

여기서, $\Delta V(t,k)$: 시간 t 에서 $Xmtr(t)$ 이 1.0(p.u.)인 경우 송출단에서 노드 k 까지의 고압측 전압강하

그리고 송출전압은 모든 노드의 수용가 전압을 허용범위 내로 유지시켜야만 한다. 그러므로 전압보상을 상한치($\overline{V_{send}}(t)$)와 하한치($\underline{V_{send}}(t)$)는 다음과 같이 수정된다.

$$V_{send}(t) \leq \min\{V_0 \times \overline{Xmtr}(t,k)\} = \overline{V_{send}}(t) \quad (8)$$

$$V_{send}(t) \geq \max\{V_0 \times \underline{Xmtr}(t,k)\} = \underline{V_{send}}(t) \quad (9)$$

3.2 불감대폭과 실행 가능한 LDC 정정치 범위

실제 ULTC는 탭 스텝 (tap step)과 운용범위(식 (3))를 가지는 이산적(discrete) 운용을 한다. 그리고 탭 동작 횟수를 줄이기 위해 불감대폭($\pm \mathcal{E}$) 고려하는데, 식 (1)의 송출전압이 현재 탭의 불감대폭 내에 존재하면 ULTC 탭은 움직이지 않고, 불감대폭 이외에 존재하면 탭을 상승하거나 강하한다. 일반적으로 불감대폭은 탭 스텝보다 큰데, 불감대폭을 고려하지 않고 3.1절에서 계산된 적정 송출전압(=기준전압*전압보상율)을 그대로 이용한다면 전압 제약조건을 만족시키지 못할 수도 있다. ($\mathcal{E} = \text{tap step}$)를 예로 들면, 그림 2에서 굵은 실선은 3.1절에서 산출된 송출전압의 상한치와 하한치를 의미한다. 이때 실제 탭 운용을 보면, 상한치에 대해서는 하강시 전압문제(Violation 1)가 발생하고, 하한치에 대해서는 탭 상승시 전압문제(Violation 2)가 발생한다. 그러므로 LDC 정정치를 설계하기 위한 적정 송출전압의 상한치($\overline{V_{send}}(t)_D$)와 하한치($\underline{V_{send}}(t)_D$)는 불감대폭만큼 감소한 그림 2의 회색 사각형(Acceptable)과 같고, 다음 식을 이용해 수정 된다.

$$\pm \mathcal{E} < (\text{tap step}/2) \quad \begin{aligned} \overline{V_{send}}(t)_D &= \overline{V_{send}}(t) - (\text{tap step} - \mathcal{E}) \\ \underline{V_{send}}(t)_D &= \underline{V_{send}}(t) + (\text{tap step} - \mathcal{E}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\pm \mathcal{E} \geq (\text{tap step}/2) \quad \begin{aligned} \overline{V_{send}}(t)_D &= \overline{V_{send}}(t) - \mathcal{E} \\ \underline{V_{send}}(t)_D &= \underline{V_{send}}(t) + \mathcal{E} \end{aligned} \quad (11)$$

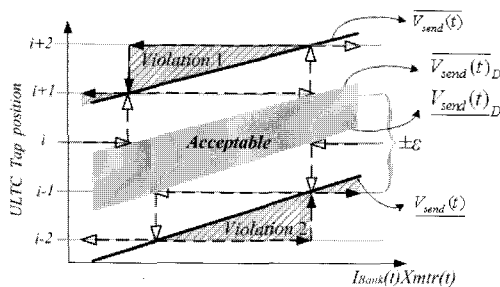


그림 2 불감대폭을 고려하는 탭 운용
Fig. 2 Tap Operation Considering Deadband

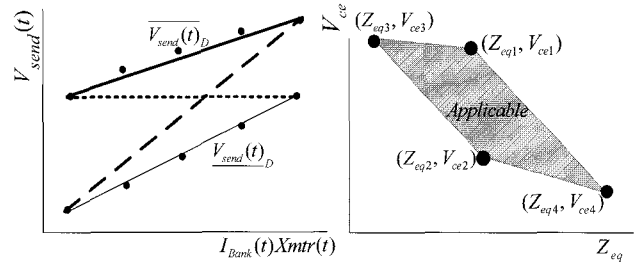


그림 3 LDC 정정치 설계 방법
Fig. 3 Design Method of LDC Parameters

송출전압은 식 (1)과 같이 송출전류에 대하여 선형관계식으로 표현될 수 있는데, LDC 정정치는 식 (10)과 (11)를 이용해 수정된 송출전압과 벡터전류를 이용하여 다음과 같이 설계된다. 그림 3에서 (Z_{eq1}, V_{ce1}) 은 모든 부하에 대해 송출전압의 상한치(굵은 선)를 이용, (Z_{eq2}, V_{ce2}) 는 모든 부하에 대해 송출전압의 하한치(실선)를 이용, (Z_{eq3}, V_{ce3}) 는 경부하시 송출전압의 상한치와 중부하시 송출전압의 하한치(점선)를 이용, (Z_{eq4}, V_{ce4}) 는 경부하시 송출전압의 하한치와 중부하시 송출전압의 상한치(파선)를 이용한다.

4. LDC 정정치 분포 특성

앞 절에서 설명된 것처럼 실행 가능한 LDC 정정치는 일정 범위를 가지고 있는데, LDC 전압조정범에 의한 ULTC 운용시 어느 LDC 정정치를 이용할 것인가가 문제로 대두된다. 즉 배전계통 운용 목적에 따라 LDC 정정치를 적절하게 선택할 필요가 있다. 배전계통의 전압문제에서 수용가 전압의 안정성과 ULTC 탭 동작횟수는 중요한 과제이다. 어떠한 상황에서도 원활하게 전기기기를 사용하기 위해 수용가 전압은 범에서 정한 허용범위 내에 존재해야 하며, ULTC의 기계적 수명을 위해 되도록 탭 동작횟수를 줄이는 것이 권고된다. 더욱이 환경문제의 해결책으로써 배전계통에 DG 도입도 계속 증가하고 있다.

본 논문에서는, 그림 3의 우측 그림에서 보여진 것처럼 실행 가능한 LDC 정정치의 범위 내에서 목적(수용가 전압의 안정성, 탭 동작횟수 감소, DG 도입 증가)에 따라 적정 LDC 정정치를 설계한다. 물론 각각의 목적에 맞는 최적 LDC 정정치가 존재하지만 그 최적 정정치를 사용할 경우 각 목적들 사이에 충돌이 발생한다. 그러므로 본 논문에서는 각 목적의 최적 값이 아닌 어느 정도의 적정성을 만족하는 LDC 정정치의 범위를 산출한다. 식 (12) PI(Performance

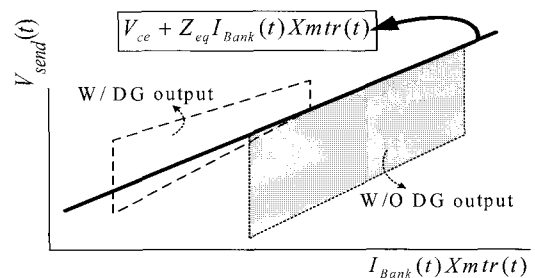


그림 4 DG 출력변동에 유연한 LDC 정정치
Fig. 4 Feasible LDC Parameters for a Varying DG Output

Index)는 수용가 전압의 안정성을 나타내는 지표(수용가 전압이 표준전압에 얼마나 근접한가)인데, α 를 만족하는 LDC 정정치를 설계한다. 식 (13) TMN (Tap Movement Number)은 고찰 시간동안 운용된 총 탭 동작횟수를 의미하는데, β 를 만족하는 LDC 정정치를 설계한다. 마지막으로 DG 도입을 증가시킬 수 있는 LDC 정정치를 설계하는데, 그림 4의 직선과 같이 DG 출력변동(0~100%)에 대하여 유연한 LDC 정정치가 존재할 때까지 DG는 도입될 수 있다.

$$PI = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^N \{ (v1(t,k) - 220)^2 + (220 - v2(t,k))^2 \} < \alpha \quad (12)$$

$$TMN = \sum_{t=2}^T \{ Tap_p(t) - Tap_p(t-1) \} < \beta \quad (13)$$

여기서, T : 전체 고찰기간, N : 노드의 총수, $v1(t,k)$ 과 $v2(t,k)$: 시간 t 에서의 노드 k 의 주상변압기 직하와 말단 수용가 전압, $Tap_p(t)$: 시간 t 에서의 ULTC 탭 위치

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

배전용변전소 ULTC의 운용에 있어서, 각 목적(수용가 전압의 안정성, 탭 동작횟수 감소, DG 도입 증가)에 따른 LDC 정정치와 이에 기반한 최대 도입 가능한 DG 용량을 그림 5의 모델 배전계통과 그림 6의 부하분포에 대하여 산정한다.

5.1 모델계통과 시뮬레이션 조건

- 기준전압=22.9(kV), 기준용량=100(MVA),
 - 표준전압 : 220(V),
 - 수용가전압의 허용범위 : 207~233(V),
 - 피크 부하시 전압강하 : $\Delta v1 = 8(V)$, $\Delta v2 = 16(V)$,
 - ULTC 탭 스텝과 불감대폭($\pm \epsilon$) : 0.0125(p.u.),
 - 주상변압기 탭 비율(ΔV_{feeder} : 고압측 전압강하)
- $$\Delta V_{feeder} \leq 5(\%): 22.9(KV)/230(V)$$
- $$5(\%) < \Delta V_{feeder} \leq 10(\%): 21.8(KV)/230(V)$$
- DG는 24시간동안 전력을 발생한다.
 - DG는 단독 노드와 다수 노드에 도입된다.

5.2 LDC 정정치 범위

실행 가능한 LDC 정정치는 수용가 전압을 만족하는 송출전압과 배크전류를 이용하여 산정하는데, 그림 7은 제안된 LDC 정정치 설계 방법의 유효성을 나타낸다. 그림 7에서 회색 면적은 탐색에 의한 실행 가능한 LDC 정정치 범위를 나타내는데, 불감대폭과 이산적 ULTC 동작을 고려한다. 반면 검은 점선과 실선으로 둘러싸인 범위는 제안된 방법에 의한(송출전압이 1.0(p.u.)) LDC 정정치의 범위를 나타내는데, 점선은 불감대폭을 고려하지 않은 경우이고 실선은 불감대폭을 고려한 경우이다. 불감대폭을 고려한 LDC 정정치의 범위는 식 (11)에서 나타난 것처럼, 불감대폭을 고려하지 않은 경우에서 불감대폭만큼 감소한 결과이다. 그림 7에서 보인 것처럼 불감대폭을 고려한 LDC 정정치(검은 실선)가 탐색에 의한 LDC 정정치 범위(회색 면적) 안에 존재하기 때문에 제안된 방법의 유효성을 확인할 수 있다. 따라서, 산정

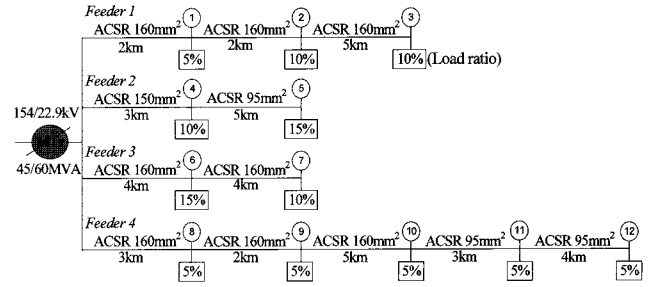


그림 5 모델 배전계통
Fig. 5 Model Distribution Network

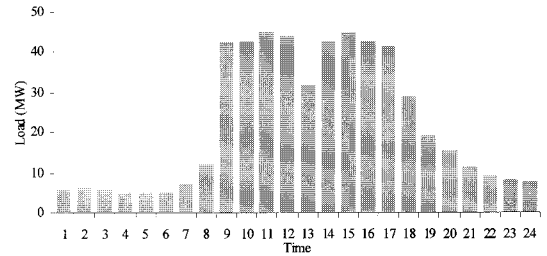


그림 6 일부하 곡선
Fig. 6 Daily Load Curve

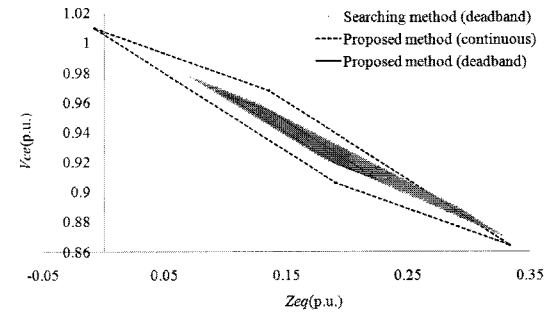


그림 7 LDC 정정치 범위
Fig 7 LDC Parameters Ranges

된 LDC 정정치 범위(검은 실선)를 이용해 각 목적에 따른 LDC 정정치와 도입 가능한 최대 DG 용량을 산정한다.

5.3 PI를 고려한 LDC 정정치

우선, 식 (12)의 α 값을 결정하기 위하여, 탐색방법에 의한 α 의 분포를 먼저 확인하는데, α 가 작으면 실행 가능한 LDC 정정치의 범위는 작아지고 도입 가능한 DG 용량도 작아진다. 그림 6의 분하분포에 대하여 이용할 수 있는 초기 탭은 0.975, 0.9875, 1.0(p.u.)이다. 2.2절의 제약조건을 만족하는 실행 가능한 LDC 정정치를 탐색한 결과, 초기 탭이 0.975(p.u.)인 경우 PI 값은 10,457($Z_{eq}=0.139(p.u.)$, $V_{ce}=0.952(p.u.)$)부터 13,782(0.256, 0.904)이고, 초기 탭이 0.9875(p.u.)인 경우 PI 값은 10,156(0.179, 0.923)부터 13,406(0.152, 0.948)이며, 초기 탭이 1.0(p.u.)인 경우 PI 값은 10,390(0.179, 0.923)부터 15,755(0.152, 0.948)이다. 본 논문에서는 α 을 임의적으로 11,000으로 상정하고, DG 도입에 있어서 이 α 를 만족하며 DG 출력변동(0~100%)에 대하여 유연한 LDC 정정치가 존재할 때까지 DG는 도입될 수 있다.

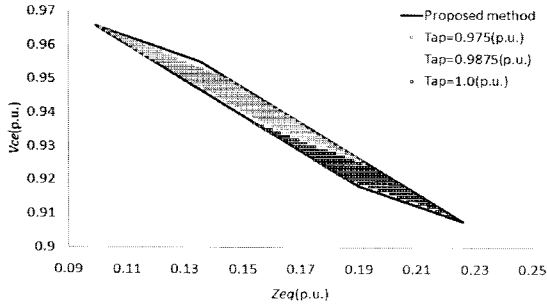


그림 8 초기 탭에 따른 LDC 정정치 범위 ($\alpha < 11,000$)
 Fig. 8 LDC Parameters Ranges According to Initial Taps

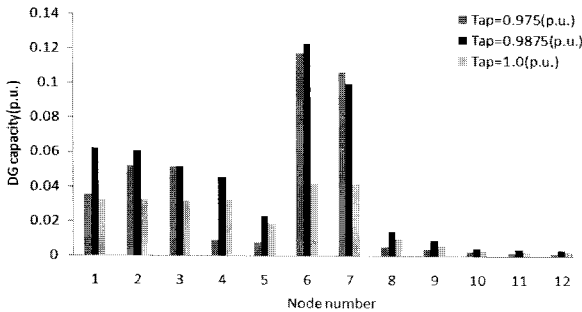


그림 9 PI를 고려한 최대 도입 가능한 DG 용량 ($\alpha < 11,000$)
 Fig. 9 Maximum Installable DG Capacity Considering PI

그림 8은 위의 α 값을 만족하는 초기 탭에 따른 실행 가능한 LDC 정정치의 범위를 나타낸다(DG 출력 0%). 초기 탭이 0.975(p.u.)와 1.0(p.u.)인 경우 LDC 정정치의 범위는 교차되지 않고, 초기 탭이 0.9875(p.u.)인 경우 초기 탭 0.975(p.u.)와 1.0(p.u.)의 LDC 정정치 범위를 포함한다. PI 관점에서, 초기 탭 0.9875(p.u.)이 이용할 수 있는 초기 탭중 가운데 위치하기 때문에 실행 가능한 LDC 정정치 범위가 가장 넓다. 따라서 그림 9에서 보인 것처럼 각 노드에 대해 초기 탭이 0.9875(p.u.)인 경우 DG는 가장 많이 도입될 수 있다.

5.4 ULTC 탭 동작횟수를 고려한 LDC 정정치

식 (13)의 β 값을 결정하기 위하여, 탐색방법에 의한 β 의 분포를 먼저 확인하는데, β 가 작으면 실행 가능한 LDC 정정치 범위는 작아지고 더불어 도입 가능한 DG 용량도 작아진다. 2.2절의 제약조건을 만족하는 실행 가능한 LDC 정정치를 탐색한 결과, 초기 탭이 0.975(p.u.)인 경우 TMN 값은 4회($Z_{eq}=0.071$ (p.u.), $V_{ce}=0.977$ (p.u.))부터 9회(0.308, 0.88)이고, 초기 탭이 0.9875(p.u.)인 경우 TMN 값은 3회(0.071, 0.977)부터 10회(0.308, 0.88)이며, 초기 탭이 1.0(p.u.)인 경우 TMN 값은 2회(0.071, 0.977)부터 11회(0.308, 0.88)이다. 본 논문에서는 β 를 임의적으로 각 초기 탭에 따라 4, 3, 2회로 상정하고, DG 도입에 있어서 이들 β 를 만족하고 DG 출력변동(0~100%)에 대하여 유연한 LDC 정정치가 존재할 때까지 DG는 도입될 수 있다.

그림 10은 β 조건을 만족하는 초기 탭에 따른 실행 가능한 LDC 정정치의 범위를 나타낸다(DG 출력 0%). 초기 탭이 0.975(p.u.)와 0.9875(p.u.)인 경우 초기 탭에 관계없이 동일한 범위를 가지고, 초기 탭이 1.0(p.u.)인 경우 그 범위는

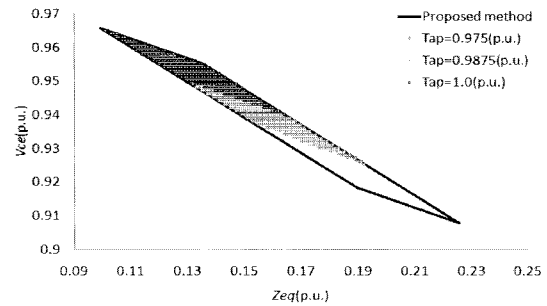


그림 10 초기 탭에 따른 LDC 정정치 범위 ($\beta \leq 4$ (초기 탭 =0.975(p.u.)), $\beta \leq 3$ (초기 탭=0.9875), $\beta \leq 2$ (초기 탭=1.0))
 Fig. 10 LDC Parameters Ranges According to Initial Taps

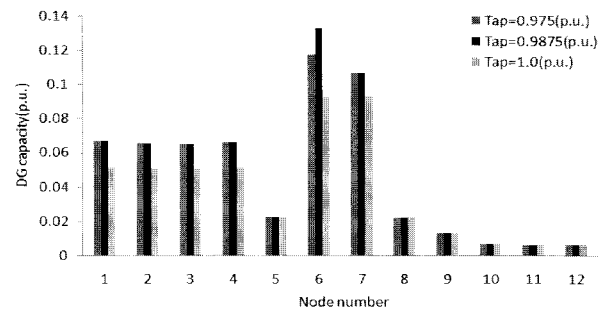


그림 11 TMN을 고려한 DG 최대 도입 가능 용량 ($\beta \leq 4$ (초기 탭=0.975(p.u.)), $\beta \leq 3$ (초기 탭=0.9875), $\beta \leq 2$ (초기 탭=1.0))
 Fig. 11 Maximum Installable DG Capacity Considering TMN

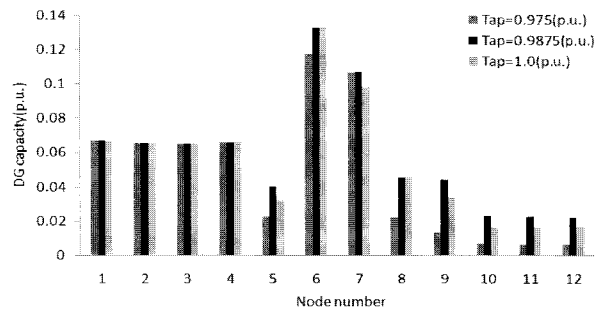


그림 12 각 노드에 도입 가능한 최대 DG 용량
 Fig. 12 Maximum Installable DG Capacity at Single Node

상당히 줄어든다. 그림 11은 ULTC의 탭 동작횟수를 고려하는 초기 탭에 따른 각 노드에 도입 가능한 DG 용량을 나타낸다. 초기 탭이 1.0(p.u.)인 경우 실행 가능한 LDC 정정치의 범위가 작으므로 도입 가능한 DG 용량도 가장 작다.

5.5 DG 도입을 고려한 LDC 정정치 (단독 노드)

일정 기간 미리 설정된 LDC 정정치가 이용되고, DG 출력변동은 예측 불가능하기 때문에, DG 출력변동(0~100%)에 관계없이 이용될 수 있는 LDC 정정치가 존재하지 않는다면 전압문제가 발생할 수 있다. 즉 유연한 LDC 정정치가 존재할 때까지 DG는 도입될 수 있는데, 각 노드에 도입 가능한 DG 용량은 그림 12와 같다. 특히, DG는 주상변압기

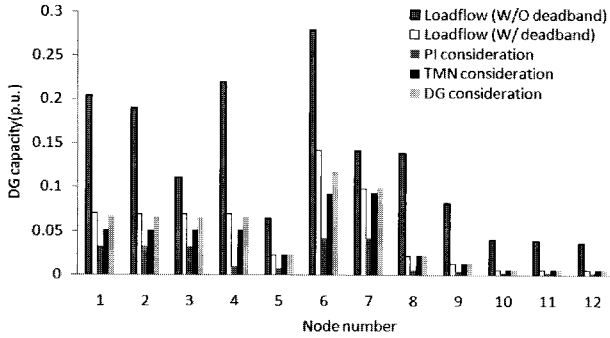


그림 13 초기 탭에 관계없이 도입 가능한 최대 DG 용량
Fig. 13 Maximum Installable DG Capacity

탭 비율이 높은 노드들(그림 5의 5, 10, 11, 12)에 도입되기 어렵다. 그 이유는 식 (9)의 송출전압의 하한치가 노드 6(DG 출력 0%)에서 결정되고, 식 (4)의 고압측 전압이 낮기 때문에 DG 도입에 의한 전압상승을 허용하지 않는다. 그리고 DG는 노드 6, 7에 더욱 많이 도입될 수 있는데, DG 도입에 의해 송출전압의 하한치가 더 낮아질 수 있기 때문이다. 그림 13은 각 목적에 따라 최대로 도입될 수 있는 DG 용량을 나타내는데, 각 초기 탭에 따른 DG 용량(그림 9, 11, 12)의 최소값으로 결정된다. 즉, 초기 탭의 위치에 관계없이 각 목적에 따라 각 노드에 연결될 수 있는 최대 DG 용량을 의미한다. 먼저 그림 13은 두 가지 이론치와 세 가지 계산치를 보여준다. 이론치로서 Loadflow(W/O deadband)는 적정 ULTC 탭이 존재할 때까지 도입될 수 있는 최대 DG 용량을 나타내고, Loadflow(W/ deadband)는 불감대폭을 고려한 LDC 전압조정 방안에 의한 DG 용량을 나타낸다. 불감대폭의 고려가 DG 도입을 상당히 제한함을 알 수 있다. 또한 계산치로서, PI consideration과 TMN consideration은 α 와 β 를 만족하며 DG 출력변동에 대하여 유연한 LDC 정정치가 존재하는 최대 DG 용량을 나타내고, DG consideration은 α 와 β 와 관계없이 유연한 LDC 정정치가 존재하는 최대 DG 용량을 나타낸다. 식 (12)와 (13)의 PI와 TMN의 고려는 DG 도입에 제약을 가하는데 특히 PI는 모든 노드에 대하여 상당한 영향을 끼친다. 그 이유는 수용가 전압의 안정성을 위해서는 식 (8)과 (9)의 중간값이 적당하기 때문에 식 (4)의 상한치까지 전압상승을 허용하지 않고 그러므로 DG의 도입은 어렵다. 또한 Loadflow(W/O deadband)와 DG consideration에 의한 결과를 비교해 보면, 도입 가능한 최대 DG 용량은 큰 차이가 없다. 즉 본 논문에서 제안한 방법의 유효성을 확인할 수 있다.

5.6 도입 가능한 최대 DG 용량 (두 노드)

DG가 두 노드에 도입되는 경우(DG1, DG2), 4가지 출력변동에 대하여 유연한 LDC 정정치가 존재할 때까지 도입될 수 있다. 그 4가지 출력변동은 (DG1, DG2), (DG1, 0), (0, DG2), (0, 0)이다. 그림 14, 15, 16은 노드 1에 연결된 DG1의 변화에 따라 노드 3, 5, 6에 최대로 도입 가능한 DG3, DG5, DG6를 나타낸다. 각 그림에서 선 그래프는 두 노드에 도입될 수 있는 총 DG 용량을 의미한다. 그림 14는 동일 선로의 송출단과 말단에 연결되는 DG 분포를 나타내는데, 두

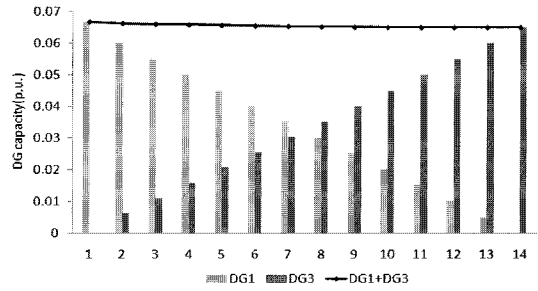


그림 14 노드 1과 3에 연결된 DG 분포
Fig. 14 DG Distribution Connected to Both Node 1 and 3

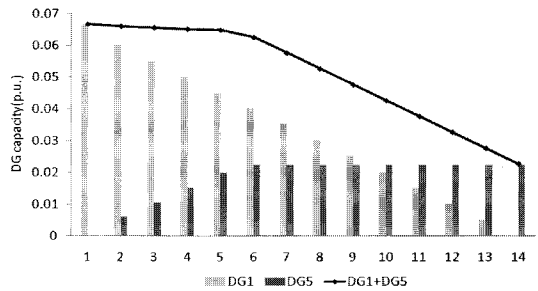


그림 15 노드 1과 5에 연결된 DG 분포
Fig. 15 DG Distribution Connected to Both Node 1 and 5

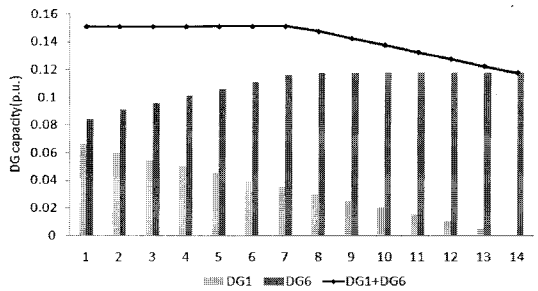


그림 16 노드 1과 6에 연결된 DG 분포
Fig. 16 DG Distribution Connected to Both Node 1 and 6

노드에 도입된 총 DG(DG1+DG3) 용량은 그림 13에서 얻은 DG consideration에 의한 결과를 초과할 수 없고, DG1과 DG3 분포에 관계없이 일정하다. 그림 15는 서로 다른 선로와 서로 다른 주상변압기 탭 비율을 갖는 노드들에 DG가 도입된 경우인데, 두 노드에 도입된 총 DG(DG1+DG5) 용량은 그림 13에서 얻은 DG consideration에 의한 결과를 초과할 수 없고, DG5 증가에 따라 급격히 감소한다. 그림 16은 서로 다른 선로와 동일한 주상변압기 탭 비율을 갖는 노드들에 DG가 도입된 경우이다. 특히 노드 6은 DG 출력이 없는 경우 식 (9)의 송출전압의 하한치를 결정하는 노드이기 때문에 두 노드에 연결된 DG(DG1+DG6) 총 도입 용량은 그림 13에서 얻은 DG consideration에 의한 결과를 초과할 수 있고, DG1과 DG6 분포에 따라 완만한 감소를 보여준다. 이들 결과는 DG 도입을 증가시키기 위해 시스템 전체적 DG 할당 최적화의 중요성을 보여준다.

6. 결 론

전력분야에의 컴퓨터, 전력전자 등 첨단기술의 활용과 환경문제에 의한 DG 도입 증가로 인하여 전압문제에 대한 관심은 점점 증가하고 있다. 또한 DG 연계의 기술적 문제에 있어서, 배전계통의 전압조정기 운용 방법은 기존 전력계통의 DG 수용 한계를 결정짓는 중요한 척도이다. 배전계통의 전압문제에 가장 큰 영향을 미치는 ULTC의 송출전압은 미리 설정된 LDC 정정치와 불감대폭을 고려하여 탭 동작으로써 운용된다. 즉, LDC 전압조정법에 의한 송출전압 결정문제는 각 수용가의 전압이 합리적 분포가 되도록 LDC 정정치를 설계하는 것이다. 그러므로 본 논문에서는 배전모델계통 시뮬레이션을 통하여 부하변동과 DG 출력 변동에 대응할 수 있는 LDC 정정치를 설계하는 방법을 제시하였다. 또한 수용가 전압의 안정성, 탭 동작횟수 감소, DG 도입 증가를 목표로 하는 적정 LDC 정정치를 설계하였고, 이에 기반을 두어 도입 가능한 최대 DG 용량을 산정하였다. 마지막으로 DG 도입을 증가하기 위해 시스템 전체적 DG 할당 최적화의 중요성을 설명하였다.

참 고 문 헌

- [1] N.D. Hatziaargyriou & A.P.S Meliopoulos, "Distributed energy sources : Technical challenges", IEEE-PES Winter Meeting 2002, vol 2, pp.1017-1022, 2002.
- [2] J.A.P. Lopes, "Integration of dispersed generation on distribution network-impact studies", IEEE-PES Winter Meeting 2002, vol 1, pp.323-328, 2002.
- [3] Embedded Generation and Network Management Issues, DTI Publication, 2000.
- [4] 김미영, 노대석, 오용택, 안재윤, 김재언, 김웅상, "분산형전원이 도입된 배전계통의 최적전압조정방안에 관한 연구", 대한 전기학회 논문지, 5호, 제 54A권, pp.251-258, 2005. 5.
- [5] Jae-eon Kim, J. Hajime Kita, Tetsuo Tezuka, and Yoshikazu Nishikawa, "Methods of determining introduction limits of dispersed generation systems in a distribution system", Electrical Engineering in Japan, vol. 120, no. 4, pp.48-58, 1997.
- [6] Miyoung Kim, Ryoichi Hara, Hiroyuki Kita, "Design of the Optimal ULTC Parameters in Distribution System with Distributed Generations", IEEE Trans. power systems, vol. 24, no. 1, pp.297-305, February. 2009.

저 자 소 개



김 미 영 (金美映)

1971년 8월 5일생. 1994년 충북대학교 물리학과 졸업. 2005년 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업(석사). 2008년 북해도대학교 정보과학연구과 졸업(공학박). 배전계통 운용, 분산형전원, 신재생에너지, 마이크로그리드, 전압품질 해석 등의 연구분야에 관심.

Tel : 041-560-1167

E-mail : fssp@kut.ac.kr