

배전계통에서 분산전원 운전가능 범위에 대한 연구

정원재, 김태웅, 김재연
충북대학교

A Study on Permissible Operation Limit of Distributed Generation System in Distribution System

Won-Jae Jung, Tae-Eung Kim, Jae-Eon Kim
Chungbuk National University

Abstract - Nowadays, small scale DGS(Distributed Generation System), as a wind power generation or photovoltaic generation, becomes to be introduced into the power distribution system. But in that case, it is difficult to properly maintain the terminal voltage of low voltage customers by using only LDC(Line Drop Compensator). So, it is necessary to determine the permissible operation limit of the introduced DGS for proper voltage in distribution system. In this paper clarifies the relationship between LDC voltage regulation principle and real, reactive power of DGS, and examines the permissible operation limit of the introduced DGS in distribution system which the voltage is controlled by LDC.

1. 서 론

분산전원이라함은 열병합발전이나 연료전지발전같이 배전계통에 연결되는 어떤 전기적인 에너지원이라 할 수 있다. 이것은 빠른 확장과 상품화의 시대에 들어서고 있고 있다. 그러나 분산전원이 도입된 배전계통에서는 단방향 전력조류만을 고려한 기존의 LDC 전압조정체계하의 배전계통에 분산전원이 도입될 경우 전력품질유지 즉, 수용가의 적정전압유지가 어렵게 된다. 따라서, 분산전원이 소규모로 도입되는 배전계통의 운용체계로서 고려될 수 있는 가장 기본적인 형태는 기존의 전압운용 체계를 바꾸지 않고, 그대로 활용하면서 분산전원의 계통연계운전을 무리 없이 수용할 수 있는 체계가 될 것이다. 이러한 조건을 만족하는 방법중의 하나는 기존의 LDC가 적정전압유지 범위를 유지할 수 있는 분산전원의 운전가능범위를 결정하여주고 분산전원의 도입량을 관리하는 방법일 것이다.

최근에 분산전원의 도입한계량에 관한 논문으로는 참고문헌 [2]가 있는데 위의 논문에서는 계통운영자의 판단에 의해 분산전원의 도입시 송출기준전압저하의 허용 한도가 결정되므로 정확한 도입한계량을 산출하기가 어렵고 LCT의 탭이 동작하거나 배전계통의 선로전압이 전압허용범위를 벗어나는 경우가 발생하였다.

따라서, 본 논문에서는 이의 단점을 보완하고자 보다 합리적인 모델배전계통을 선정하였고, 기존의 LDC로 잘 운전되고있는 배전계통에 분산전원이 도입되었을 때에도 기존 배전계통이 잘 유지되도록 분산전원의 운전가능범위를 결정하였다.

2. 배전계통모델과 분산전원 도입에 따른 영향

2.1 배전계통모델

분산전원이 LDC전압조정방식에 의해 전압조정되고 있는 기존의 배전계통에 연계되었을 경우의 전압변동영

향을 분석하기 위한 대상도입 배전계통으로는 주변압기 용량 45/60MVA, 배전선로의 기준용량은 100MVA, 기준전압은 22.9kV로 하였고, 각각의 피더는 용량이 10MVA이다.

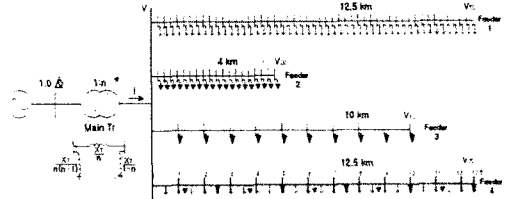
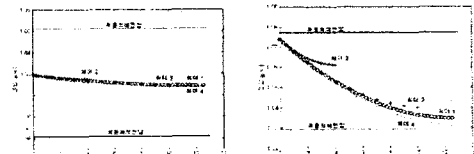


그림 1 모델 배전계통

그림 1과 같은 배전계통모델에 있어서, 중부하시 최대 부하전류 및 부하역률, 그리고 경부하시의 최소부하전류는 각각 $I_{max}=0.38039$ p.u., $\cos \theta_{max}=0.89252$, $I_{min}=0.09053$ p.u.,로 되어, 이 때의 $V_{spo,max}=1.08039$ p.u., $V_{spo,min}=1.01854$ p.u.로 구해져, 이것을 기본 데이터로 하여 LDC내부의 셋팅계수는 참고문헌 [2]의 식(2)~(4)에 의거 각각 $R=0.19045$, $X=0.09624$, $V_0=0.99922$ 로 산출되었다. 분산전원이 도입되지 않았을 때 경부하시 및 중부하시의 배전선로 전압변화는 그림2와 같다.

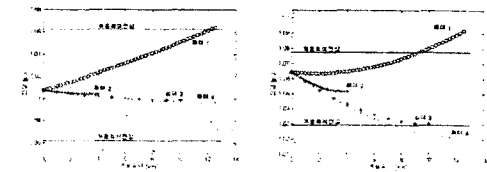


(a) 경부하시 (b)중부하시

그림 2 분산전원이 도입되지 않은 경우의 선로전압

그림2에서 보면, 수용가 단자전압유지의 허용범위 207~233V를 고려한 중부하시 고압배전선의 유지범위 1.02925p.u.~1.07735p.u., 경부하시 고압배전선의 유지범위 0.96186p.u.~1.06238p.u.을 모두 만족하고 있다. 따라서 선정된 모델 배전계통은 수용가 단자전압의 허용범위를 잘 유지할 수 있도록 전압조정이 이루어짐을 알 수 있다.

2.2 분산전원의 도입이 기존배전계통에 미치는 영향 분석



(a) 경부하시 (b)중부하시

그림 3 분산전원이 도입된 경우의 선로전압

분산전원의 영향을 분석하기 위하여, 모델계통의 피더 1의 마지막 노드에 지상역률 0.9로 운전하는 9MVA 분산전원을 도입하였다.

그림3을 보면, 특히 중부하시 배전계통에 분산전원이 도입됨으로써 주변압기 2차측의 부하전류가 감소되어 송출전압이 저하하게 되고, 분산전원이 도입된 선로에서는 역조류가 흘러 분산전원이 도입된 선로 말단부에 위치한 저압수용가의 전압이 상승하여 전압허용범위를 벗어났다. 또한 이러한 현상은 전압유지 허용범위의 여유가 있는 경우하시보다는 중부하시에 송출전압의 변화로 인해 저전압 또는 과전압 수용가가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 이때 도입되는 분산전원의 운전역률도 진상보다는 지상의 경우가 그 영향이 더욱 두드러지게 된다는 것을 알 수 있었다.

3. 분산전원의 운전가능범위 결정을 위한 필요조건

분산전원이 도입된 배전계통의 전압변동 원인은 주변압기탭의 동작, 주변압기 임피던스에 의한 전압변동, 선로 임피던스에 의한 전압변동이라는 분석결과에 근거하여, 분산전원의 배전계통도입시 도입대상 배전계통의 적정전압 조정에 영향을 미치지 않기 위해서 중부하시에 만족해야 할 조건은 첫째, 중부하시에 변전소 주변압기의 탭이 동작해서는 안되고 둘째, 중부하시 선로전압프로파일이 전압 허용범위내에 있어야 한다.

3.1 분산전원의 출력과 주변압기탭 동작과의 관계

분산전원의 도입한계량을 유도하기 위하여 배전계통에 분산전원이 도입되지 않았을 때 다음과 같이 몇 개의 변수를 정의한다.

P_{0j}, Q_{0j} : 번호가 j 인 피더의 변전소에서 송출점 유효전력과 무효전력

$P_{00} = P_{01} + P_{02} + P_{03} + P_{04}, Q_{00} = Q_{01} + Q_{02} + Q_{03} + Q_{04}$

$\hat{V} = V\angle 0$ ($P_{00} + jQ_{00}$ 에 대한 변전소 모선에서의 전압)

이 때 벡터전류는 $(P_{00} + jQ_{00})/V$ 가 되고, 이러한 조건하에서 LDC의 운전특성으로부터 다음과 같은 부등식을 만족시켜야 한다.

$$V_0 - 0.01 < \sqrt{V^2 - 2(RP_{00} + XQ_{00}) + (R^2 + X^2)(P_{00}^2 + Q_{00}^2)/V^2} < V_0 + 0.01 \quad (1)$$

단위법으로 표현하면, V 는 1.0에 가깝게 되고 여기서 $-2(RP_{00} + XQ_{00})$ 는 $(R^2 + X^2)(P_{00}^2 + Q_{00}^2)/V^2$ 에 비해 매우 크다. 따라서, 식(1)은 식(2)와 같이 간략화 될 수 있다.

$$V_0 - 0.01 < \sqrt{V^2 - 2(RP_{00} + XQ_{00})} < V_0 + 0.01 \quad (2)$$

피더1의 10번, 30번, 50번 노드에 분산전원이 도입되고 각 노드에 도입된 전력이 각각 $P_{G10} + jQ_{G10}, P_{G30} + jQ_{G30}, P_{G50} + jQ_{G50}$ 이라 가정하자. 이 때, 분산전원의 도입으로 인한 주변압기에서의 전압변화량을 ΔV 라 한다면, LDC에 의한 주변압기탭이 동작하지 않기 위해서는 아래의 부등식이 만족되어야만 한다.

$$V_0 - 0.01 \sqrt{(V + \Delta V)^2 - 2(RP_{GT} - P_{GT}) + X(Q_{GT} - Q_{GT})} < V_0 + 0.01 \quad (3)$$

$$(P_{GT} = P_{G10} + P_{G30} + P_{G50}, Q_{GT} = Q_{G10} + Q_{G30} + Q_{G50})$$

3.2 분산전원의 출력량과 전압허용범위와의 관계

배전계통에 분산전원이 도입되었을 때 주변압기뱅크의 출력은 분산전원의 용량만큼 변하게 되고, 주변압기의 2차측 전류도 분산전원의 전류에 비례하여 변하게 된다. 따라서, 주변압기에서의 전압변동이 고려되어야 한다.

만약 분산전원이 지상역률로 운전된다면, 주변압기에 흐르는 전류는 분산전원에서 공급되는 전류량 만큼 감소하고 주변압기 2차측 전압변동량 ΔV 는 0보다 크게 되므로, 주변압기 직하의 수용가 전압이 상승하게 된다. 이러한 경우에 ΔV 는 상한 전압마진보다 작아야 한다. 또한 분산전원이 지상역률로 운전할 경우 ΔV 도 0이하가 되며 이것은 하한 전압마진보다 작아야 한다.

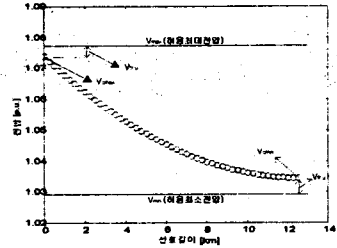


그림 4 분산전원의 출력량과 전압허용범위와의 관계

이 논문에서 배전계통에서의 전압조정 허용범위는 다음과 같이 정의된다.

$$V_{fr,u} = V_{max} - V_{cmax} \quad (4)$$

$$V_{fr,l} = V_{cmin} - V_{min} \quad (5)$$

여기에서 $V_{fr,u}$ 는 상한 전압마진이고, $V_{fr,l}$ 은 하한 전압마진, V_{max} 는 최대허용전압, V_{min} 은 최소허용전압, V_{cmax} 는 최대 수용가측전압, 그리고 V_{cmin} 은 최소 수용가측전압을 나타낸다.

저전압 수용가측의 단자전압은 탭 동작이 없을 경우에도 항상 허용범위내에 존재해야 한다. 그러므로, 다음과 같은 부등식을 만족해야 한다.

$$\text{if } \Delta V > 0, \text{ then } |\Delta V| < V_{fr,u} \quad (6)$$

$$\text{if } \Delta V < 0, \text{ then } |\Delta V| < V_{fr,l} \quad (7)$$

4. 분산전원의 운전가능범위 결정 방법

분산전원이 도입된 배전계통을 운전하기 위해서는 분산전원의 출력이 얼마큼 도입되어야 하는지 알아야 한다. 분산전원의 유효전력과 무효전력사이의 관계를 사용하는 것으로서 분산전원의 운전가능범위를 산출할 수 있다.

- Step1. 식(3)으로부터 분산전원의 유효전력과 무효전력의 공식을 유도한다.
- Step2. 식(6)과 (7)로부터 분산전원의 유효전력과 무효전력의 공식을 유도한다.
- Step3. 공통범위를 계산한다.
- Step4. 무효전력에 대한 유효전력의 최대값을 선택한다

5. 제안된 방법에 대한 고찰

5.1 제안된 방법에 의해 산출된 운전가능범위

위에서 언급한 방법에 의하여 분산전원의 수학적인 운전가능범위를 도출 하였다. 그림1과 같은 배전계통 모델에서 주변압기2차측 직하에서의 전압은 1.07389(p.u.)이고 피더말단 최소전압은 1.0309(p.u.), 변전소에서의 송출 유효전력과 무효전력은 각각 0.36459, 0.184237이다. 이러한 초기값으로부터 다음과 같은 2개의 식을 유도할 수 있다.

$$-0.0008 - 1.0731 \cdot Q_{GT} < P_{GT} < 0.0942 - 1.7031 \cdot Q_{GT} \quad (8)$$

$$-0.0853 - 13.1576 \cdot Q_{GT} < P_{CT} < 0.18711 - 13.1576 \cdot Q_{GT} \quad (9)$$

그림5는 위의 방법에 대한 분산전원의 운전가능범위를 보여주고 있다. 식(8)-(9)로부터 구한 무효전력의 범위는 진상0.9917에서 지상0까지이다. 만약 분산전원의 무효전력이 고정되어있다고 하면 최대 유효전력은 식(8)-(9)로부터 구할 수가 있다.

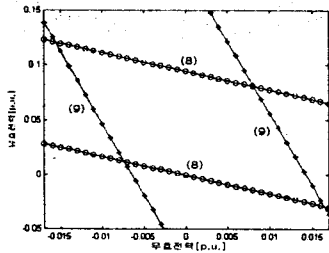


그림 5 제안된 방법에 의한 분산전원의 운전가능 범위

5.2 시뮬레이션을 이용한 운전가능범위의 검증

제안된 방법에 의해 산출된 분산전원 운전가능범위의 타당성을 증명하기 위하여 그림1의 모델배전계통에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 분산전원의 무효전력에 대하여 LCT의 탭이 변하지 않고 모든 선로에서의 전압이 전압허용범위내에 존재하는 최대 유효전력량을 취하였다. 그림6은 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

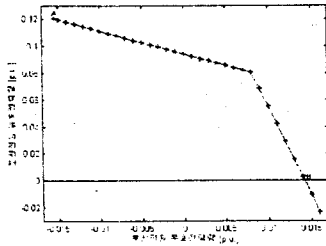


그림 6 분산전원의 운전가능 범위

위의 결과들로부터 분산전원의 운전가능범위는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 제안된 방법으로 얻어진 분산전원의 도입한계량은 시뮬레이션으로부터 얻어진 분산전원의 도입한계량과 같다.
- 분산전원이 진상운전할 경우 무효전력량이 증가함에 따라 도입 가능한 유효전력량도 증가하였다.
- 분산전원이 지상운전할 경우 무효전력량이 증가함에 따라 도입 가능한 유효전력량은 감소하였다.
- 임의의 배전계통에 대하여 분산전원의 도입한계량은 쉽게 계산될 수 있다.

위에서 구한 운전가능범위내의 분산전원이 배전계통에 도입될 경우 선로의 전압특성곡선이 적정전압 유지 범위내에 존재하는지 확인하기 위하여 피더4의 말단 노드에 표1과 같이 분산전원을 도입하였다.

표 1 분산전원의 유효·무효전력

		피더4의 마지막 노드
T1	$P_{GT} + jQ_{GT}$	0.1206-j0.0155
T2	$P_{GT} + jQ_{GT}$	0 + j0.0142

T1 : A점에서의 분산전원의 출력
T2 : B점에서의 분산전원의 출력

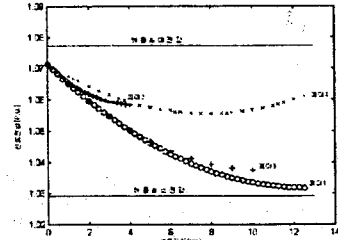


그림 7 조건T1에 대한 전압특성곡선

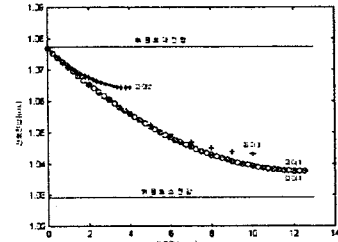


그림 8 조건T2에 대한 전압특성곡선

그림7은 A점의 분산전원 출력량이 피더4의 말단 노드에 도입되었을 때의 전압 프로파일을 보여주고 있고, 그림8은 B점의 분산전원 출력량이 피더4의 말단노드에 도입되었을 때의 전압 프로파일을 보여주고 있다.

그림7과 8에서 LCT의 탭은 동작하지 않았으며 피더의 모든 노드전압이 전압허용범위 내에 존재하였다. 결론적으로, 이 논문에서는 제안된 분산전원의 운전가능범위의 결정방법이 타당함을 증명하였다.

6. 결론

이 논문에서는 전압조정 관점으로부터 분산전원의 운전가능범위를 결정하기 위한 수식적인 방법을 제안하였다. 제안된 방법에 의한 분산전원의 유효전력과 무효전력은 시뮬레이션을 통해 구한 도입한계량과 같았다.

그러므로, LDC전압조정장치로 전압이 조정되고 있는 배전계통에 분산전원을 도입하고자 할 경우 배전계통 운용자는 쉽게 분산전원의 운전가능범위를 결정할 수가 있다.

[참고 문헌]

- [1] Electric Association Group in Japan : The Regulation and Management of Distribution Voltage. report. Vol.24. No.4. 1968.(In Japanese)
- [2] J.Kim et al. : Methods of Determining the introduction Limit of Dispersed Generation System in A distribution System from the Viewpoint of Voltage Regulation. IEE Japan. Trans., Vol.16-B
- [3] Turan G nen : Electric Power Distribution System Engineering. McGraw-Hill series in electrical engineering. McGraw-Hill. New York. 1986