

가상임피던스를 활용한 드롭 제어의 비교 및 안정성 분석

김동환, 전재량, 최재호
충북대학교

Implementation of virtual impedance and Analysis

Dong Hwan. Kim. Jaeryang Jeon, Jaeho Choi

School of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, Korea

ABSTRACT

독립운전 모드로 동작하는 분산 발전 시스템의 제어방식 중 하나로 유무효 전력제어를 통한 전력분담을 실현하기 위한 드롭제어 방식이 있다. 이 방식은 선로 임피던스가 여러 가지 복합 성분으로 구성되어 있거나 불평형일 경우 이는 유무효 전력의 분담에 있어서 여러 가지 이유로 오차를 발생시키며 이에 대한 대책으로 가상 임피던스를 추가하여 복합적 불평형 라인 임피던스에 기인한 유무효 전력 조류의 복잡성을 해결하기 위한 연구가 최근 많이 진행되어 오고 있다. 본 논문에서는 위의 사항을 고려하여 가상 임피던스를 이용하여 시스템의 유무효전력 분담을 개선하고자 하였으며 안정도 분석을 위하여 각 가상 임피던스에 소신호 모델링을 수행하고 이를 비교하였다. 각 가상 임피던스에 대한 전력분담과 안정도 해석은 각각 PSIM과 MATLAB을 통해 검증되었다.

1. 서론

최근 전기 공급의 안정성을 높이는 대안으로 다양한 분산발전이 적용되고 있다. 이 분산 발전 시스템들이 통합되어 마이크로그리드의 형태를 지니고 있는데, 이는 단일 분산 발전 시스템과 비교했을 때 향상된 신뢰성과 효율성을 지니고 있다. 이 마이크로그리드는 전력계통과 연계하여 계통연계모드로 동작을 하다가 계통에 문제가 발생할 시 계통과의 연결을 차단하여 독립운전모드로 전환하게 된다. 이러한 독립운전모드에서 부하가 요구하는 전력을 공급해주기 위해서 병렬 운전을 하는 각 분산발전시스템의 유효 전력과 무효 전력을 제어하는 드롭 제어 방식이 쓰이게 된다. 이 방식은 유효 전력과 무효 전력의 분담에 있어서 여러 가지 이유로 오차를 발생시키며 이에 대한 대책으로 가상 임피던스를 추가하여 전력 조류의 복잡성을 해결하기 위한 연구가 진행되어 오고 있다.

본 논문에서는 드롭 제어의 오차에 대한 대책 중 가상 임피던스 방식을 사용하였고, 가상 인덕터를 고려한 소신호 모델링에 대한 방법^[1]을 응용하여 임피던스 종류에 따른 안정성 분석을 PSIM과 Matlab 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 드롭 제어 및 소신호 모델링

2.1 가상 임피던스 방식

저전압에 사용되는 전송선로의 경우 저항 성분이 존재하기

때문에 유, 무효 전력 사이에 상호 간섭 성분이 생기게 되고 이로 인해 위의 선로가 유도성이라는 가정을 두고 있는 기존의 드롭 제어 방식식 $P-\omega$, $Q-E$ 은 효력을 잃게 된다. 이에 상호 간섭 성분을 해결하기 위해 선로 임피던스에 가상의 임피던스 성분을 추가하여 상호 간섭 성분을 제거해줄 수 있다. 이때 추가한 가상 임피던스에 따라 전력 조류 특성은 달라지게 된다.^[2]

추가된 가상 임피던스는 드롭 전력 제어를 거쳐 출력된 지령 전압에 출력 전류와 가상 임피던스와의 곱으로 표현된 가상 임피던스에서의 전압 강하만큼을 감해줌으로써 시스템에 적용된다.

$$E_{ref} = E^* - Z_v i_0 \quad (1)$$

ω^* : 지령주파수 ω_{nom} : 정격주파수 k_w : $P-\omega$ 드롭계수

E^* : 지령전압 E_{nom} :정격주파수 k_v : $Q-E$ 계수

2.2 소신호 모델링

본 논문에서는 비선형의 드롭 제어의 수학적 모델링을 가상 임피던스를 함께 고려한 선형 식으로 변환을 하여 시스템의 안정성을 분석하였다.

독립운전 중인 분산 발전 시스템의 등가회로를 통해 전류에 대한 소신호 식은 구하면 아래와 같이 된다.

$$\Delta i_d = \frac{1}{Z} (\Delta e_d \cos \theta + \Delta e_q \sin \theta) \quad (3)$$

$$\Delta i_q = -\frac{1}{Z} (\Delta e_d \sin \theta - \Delta e_q \cos \theta) \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에 PCC 전압 V를 곱해 줌으로써 유효 전력과 무효 전력의 선형화된 식을 구할 수 있다. 이렇게 계산된 유효 전력과 무효전력에 가상 인덕터가 사용된 드롭 제어 식을 통해 지령 주파수와 전압에 대한 식이 도출된다.

$$\Delta \omega^* = k_w \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta p \quad (5)$$

$$\Delta e_d = k_v \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta q + \omega L_v \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta i_q \quad (6)$$

$$\Delta e_q = -X_v \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta i_d \quad (7)$$

ω_c :저역필터에 대한 차단 주파수 ω =시스템 각 주파수

$\Delta\omega = s\Delta\phi$ 와 LPF를 고려하여 식 (7)과 식 (8)와 식 (9)을 정리하면 다음과 같이 정리 가능하다.

$$\Delta\ddot{\phi} + \omega_c\Delta\dot{\phi} = \omega_c k_w \Delta p \quad (8)$$

$$\Delta\dot{e}_d + \omega_c\Delta e_d = k_v\omega_c\Delta q + \omega L_v\omega_c\Delta i_q \quad (9)$$

$$\Delta\dot{e}_q + \omega_c\Delta e_q = -\omega L_v\omega_c\Delta i_d \quad (10)$$

위에서 구한 식들을 이용하여 다음과 같은 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\phi} \\ \Delta\ddot{\phi} \\ \Delta\dot{e}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a - \omega_c b & & \\ c & 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\phi \\ \Delta\dot{\phi} \\ \Delta e_d \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$a = \frac{e_d^2 + e_q^2}{e_d} \frac{\omega_c k_w V}{Z} \sin\theta$$

$$b = \frac{\omega_c k_w V}{Z} \left(\cos\theta + \frac{e_q}{e_d} \sin\theta \right)$$

$$c = \left(\frac{e_d^2 + e_q^2}{e_d} \right) \frac{\omega_c}{Z} (k_v V + \omega L_v) \cos\theta$$

$$d = -\omega_c + \frac{\omega_c}{Z} (k_v V - \omega L_v) \sin\theta + \frac{e_q}{e_d} \frac{\omega_c}{Z} (-k_v V + \omega L_v) \cos\theta$$

가상 커패시터가 사용된 드롭 제어 식을 응용한 경우에도 위와 같은 과정을 통해 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\phi} \\ \Delta\ddot{\phi} \\ \Delta\dot{e}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ e - \omega_c f & & \\ g & 0 & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\phi \\ \Delta\dot{\phi} \\ \Delta e_d \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$e = -\left(\frac{e_d^2 + e_q^2}{e_d} \right) \frac{\omega_c k_w V}{Z} \sin\theta$$

$$f = -\frac{\omega_c k_w V}{Z} \left(\cos\theta + \frac{e_q}{e_d} \sin\theta \right)$$

$$g = \left(\frac{e_d^2 + e_q^2}{e_d} \right) \frac{\omega_c}{Z} \left(k_v V - \frac{1}{\omega C_v} \right) \cos\theta$$

$$h = -\omega_c + \frac{\omega_c}{Z} \left(-k_v V + \frac{1}{\omega C_v} \right) \sin\theta + \frac{e_q}{e_d} \frac{\omega_c}{Z} \left(k_v V - \frac{1}{\omega C_v} \right) \cos\theta$$

식 (13)과 식(14)는 $\dot{X} = AX$ 꼴의 형태로 표현이 가능하고 이 형태를 이용해 특성 방정식 $|sI - A| = 0$ 의 해를 구해서 시스템의 안정성을 판별할 수 있다.

3. 시뮬레이션

시뮬레이션 조건은 먼저 V_{dc} 는 158V 이고 선로임피던스는 DG1은 $0.1 + j0.1m$ 이고 DG2는 $0.2 + j0.4m$ 이다. 가상 임피던스들은 앞 절을 통해서 0.5mH 과 5000uF으로 선정하였다.

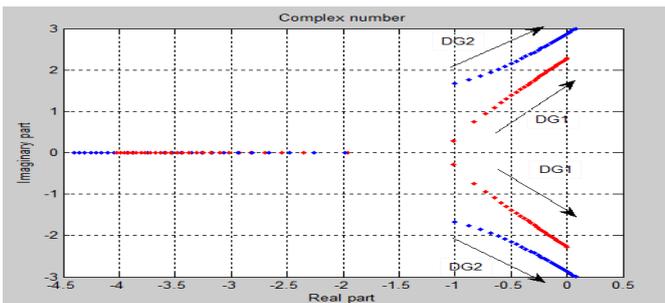


그림 1. System root locus with various $X_v = \omega L_v$, X_v from 0 to 0.26

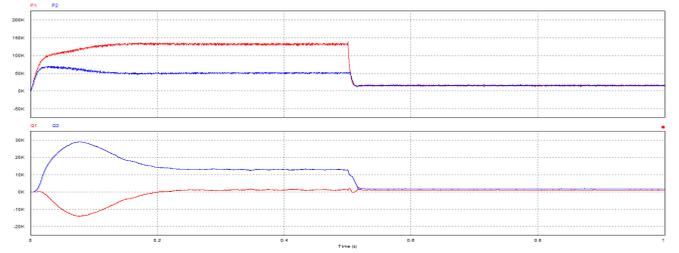


그림 2 Droop performances using virtual inductance

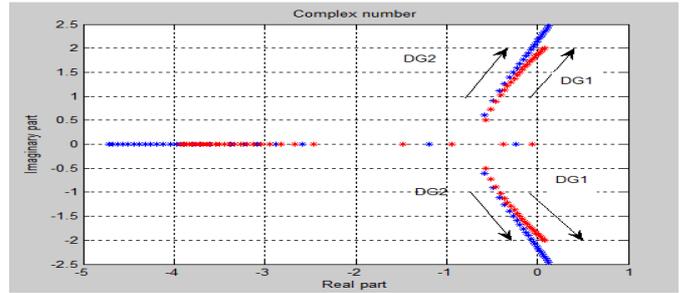


그림 3. System root locus with various $X_v = \frac{1}{\omega C_v}$, X_v from 0 to 0.6

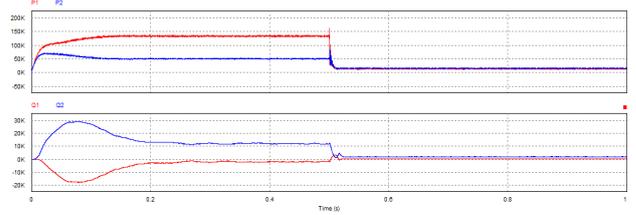


그림 4. Droop performances using virtual capacitive

4. 결론

본 논문에서는 [2]에서 보여주는 가상 인덕터를 고려한 소신호 모델링에 대한 방법을 응용하여 가상 커패시터의 경우를 소신호 모델링을 통해 안정성 분석 하였다. 이를 토대로 선정된 값을 통해 드롭 제어를 실행할 경우 유효전력 분담의 문제를 개선시킬 수 있다. 본 논문에서 사용한 간단한 가상 임피던스 방식은 선로 임피던스가 불평형일 경우 발생하는 서로 다른 전압강하는 고려하지 않았으므로 [2],[3]에서 제시한 것과 같은 추가적인 전압강하보상을 시행해 줄 경우 그로 인한 무효전력 분담의 오차를 개선해 줄 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] K. Jung, K. Lim, D. Kim and J. Choi, "Droop method for high capacity parallel inverters in islanded mode using virtual inductor," *Trans. of Korean Institute of Power Electron*, vol. 20, no. 1, pp. 81-90, 2013.
- [2] Zhong, Qing Chang, and Tomas Hornik. Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration. Vol. 97. John Wiley & Sons, 2012.
- [3] K. Lim and J. Choi, "Droop Control for Parallel Inverters in islanded microgrid considering unbalanced low voltage line impedance," *Trans. of Korean Institute of Power Electronics*, vol. 18, no. 4, pp.387-396, 2013.