

신 에너지전원의 계통연계 시 과도해석 알고리즘 개발

노 대석, 박 현석  
한국기술교육대학교

Development of Transient Analysis Algorithm for New Energy Sources  
interconnected with Distribution Systems

Daeseok Rho, Hyeonseok Park  
Korea University of Technology and Education

**Abstract** - 태양광과 풍력 등의 신·재생에너지 전원은 기후나 온도, 지형적인 영향을 많이 받기 때문에 배전계통에 연계 시, 기존 배전계통의 운용에 좋지 않은 영향은 미치게 된다. 따라서 분산전원 계통 연계 시, 부하와 전원이 혼재되어 운용되는 형태의 배전계통에서 야기되는 보호협조(과도상태)에 관한 여러 가지 문제점을 검토, 분석할 수 있는 알고리즘의 개발이 요구되고 있다.

1. 서 론

신 에너지전원이 배전계통에 도입될 경우, 이로 인해 기존 배전계통의 보호방식에 미치는 영향은 크게 정상시, 비정상상태 시로 구분될 수 있고, 특히 비정상상태시는 다시 과도상태 시와 사고 시로 구분될 수 있다. 먼저, 정상시의 경우는 상시전압변동, Flicker, 병렬로 인한 순시전압변동, 고조파, 불평형 등은 문제가 되지 않고, 분산전원 측에서 단락사고 시 역 전력 무효계전기를 채용하는 경우, 분산전원의 운전역률로 인하여 연계 점의 역률이 진상으로 쉼으로 인해 오동작할 우려가 있다. 두 번째로, 비정상상태의 과도상태대시인 경우는, 동기발전기의 비 동기 병입, 유도발전기의 기동 시 돌입전류, 동기발전기의 부 제동 현상, 커패시터 스윗칭으로 인한 상진현상(전압확대현상), 동기발전기의 자기여자현상, 유도발전기의 자기여자현상, 고립운전현상, 설비과부하현상 등으로 나뉠 수 있다. 세 번째로, 비정상상태의 사고시인 경우는, CB(or Recloser)와 Fuse간의 보호협조, 1선 시락 시 공진현상, 단락용량, 분류효과, 타 선로(회선) 사고 시 OCR의 불필요한 동작, Recloser의 정정, 재폐로 동작 등으로 나누어 분석될 필요가 있다. 여기서는 상기의 여러 가지 문제점 중에서 가장 영향력이 큰 4개의 항목에 대해서만 검토하기로 한다. 즉, 유도발전기의 기동 시 돌입전류, 커패시터 스윗칭으로 인한 공진현상(전압확대현상), 동기발전기의 자기여자현상, 유도발전기의 자기여자현상에 대하여 검토한다.

2. 본 론

2.1 유도발전기의 기동 시 돌입전류

그림 1은 유도발전기가 연계되어 있는 배전계통 모델을 나타낸 것이다. 유도발전기가 기동을 할 경우의 기동 임피던스  $Z_L$ 은 상당히 작으므로 선로에 병렬로 연결되

어 있는 부하들은 기동 시 무시하기로 한다. 또한, 배전선로는 대체적으로 변전소의 주변압기를 통하여 전압조정이 되고 있으나, 여기서는 주변압기 2차 측의 전압을 1.0 pu로 상정하여 선로에 흐르는 기동전류와 그 때의 유도발전기 연계 점에서의 전압 및 전압강하의 산출을 통하여 그 영향의 정도를 분석하여 보기로 한다. 물론 정확히 그 영향을 분석하는 데에는 주변압기의 임피던스와 Tap도 고려하여야 한다.

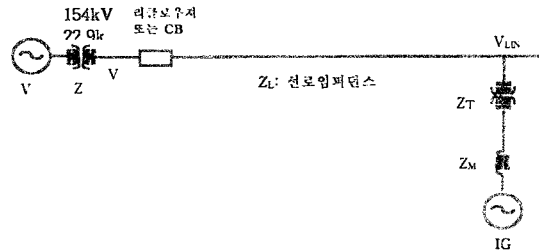


그림 1. 유도발전기가 연계된 배전계통  
( $Z_T$ : 연계용변압기의 임피던스 [pu],  $Z_T$ : 유도발전기의 기동 시 임피던스 [pu])

기동 시 선로를 흐르는 전류 I 는

$$I = \frac{1.0}{Z_L + Z_{T,C} + Z_M} = \frac{\beta S_S S_M}{(1 + \beta S_M Z_{T,C}) S_S + \beta S_M}$$

단,  $Z_L = \frac{1.0^2}{S_S}$ ,  $Z_M = \frac{1.0^2}{\beta S_M}$ ,  $\beta$ =기동전류/정격전류

(대체적으로 5-6배정도),  $S_S$  : 선로 측 단락용량[pu],  $S_M$  : 유도발전기 정격용량[pu]

로 표현될 수 있으며, 연계 점 전압  $V_{LINE}$  및 연계 점에서의 전압강하  $\Delta V_{LINE}$ 는 다음과 같다.

$$V_{LINE} = \frac{Z_{T,C} + Z_M}{Z_L + Z_{T,C} + Z_M} = \frac{(1 + \beta S_M Z_{T,C}) S_S}{(1 + \beta S_M Z_{T,C}) S_S + \beta S_M}$$

$$\Delta V_{LINE} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_{T,C} + Z_M} = \frac{\beta S_M}{(1 + \beta S_M Z_{T,C}) S_S + \beta S_M}$$

일반적으로 우리나라의 경우, 중부하시 주상변압기, 저압선로, 인입선의 전압강하를 각각 2%, 4%, 2%로 보고 있는 관계로 5% 주상변압기 13,200V/230V와 수용가 전압유지범위 207~233V를 고려한다면, 22.9kV 배전선로의 상 전압 유지범위는

$$207 V + 230 V \times 7\% \leq V_{LN} \times \frac{230 V}{13,200 V} \leq 233 V + 230 V \times 1.5\% \\ 12,804 V \leq V_{LN} \leq 13,570 V$$

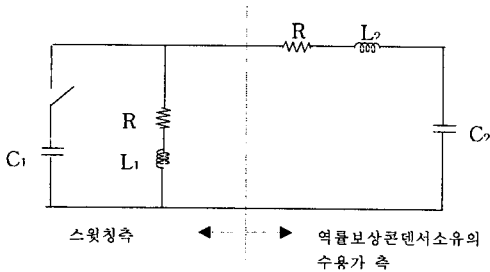
로 되어, 이를 다시 pu 값으로 환산하면, 다음과 같다.

$$0.97 \leq V_{LIN} \leq 1.0280$$

따라서 상기의 유도발전기 기동 시 돌입전류로 인한 연계 점에서의 전압  $V_{LIN}$ 은 0.97pu 와 1.028pu 의 범위를 만족하여야만 한다. 만약, 이를 만족하지 못할 경우에는 한류리액터를 유도발전기에 직렬 연결하는 형태로 하여 상기의 전압이 만족되도록 해야 할 것이다.

## 2.2 커패시터 스위칭으로 인한 공진현상

신 에너지전원이 유도발전기의 경우에는 역률보상용 콘덴서를 같이 설치하여 운용하게 된다. 유도발전기가 기동될 때 기동전류에 의한 전압강하 및 역률보상을 위하여 콘덴서가 투입되게 되면 역률보상용 콘덴서를 소유하고 있는 인접 수용에 이로 인한 전압확대현상을 야기시킬 수 있다.



$$\text{스위칭주파수 } f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \sqrt{\frac{\text{스위칭측에서문제될단락용량}}{\text{스위칭콘덴서용량}}} \times 60 [\text{Hz}]$$

$$\text{수용가 natural frequency } f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} = \sqrt{\frac{\text{수용가측에서문제될단락용량}}{\text{역률보상용콘덴서용량}}} \times 60 [\text{Hz}]$$

그림 2. 콘덴서 스위칭에 대한 등가회로

즉, 콘덴서의 스위칭 주파수  $f_1$ 과 수용가 natural frequency  $f_2$ 가 거의 비슷한 점에서 공진이 발생하여, 전압확대현상이 일어나게 된다.

## 2.3 동기발전기의 자기여자현상

동기발전기의 신 에너지전원을 소유한 수용가는 일반적으로 역률유지를 위한 콘덴서 뱅크를 설치하고 있는데, 수용가 부하가 아주 작을 때 어떤 원인으로 인하여 연계 점의 차단기가 개방하게 되면 콘덴서 뱅크의 지상 전류가 여자전류로 되어 자속을 증가시킴에 따라 동기발전기의 무부하 포화특성 곡선과 콘덴서의 전압전류특성과의 교점까지 전압이 상승하는 자기여자현상이 발생하게 된다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 콘덴서의 V-I 특성을 나타내는 직선 A, B, C가 동기발전기의 무부하포화곡선과 만나지 않으면 자기여자현상이 발생되지 않는다 (단, 연계변압기의 누설 임피던스는 무시함). 따라서 자기여자현상이 발생되지 않을 조건은 콘덴서의 V-I 특성을 나타내는 직선의 기울기( $1/\omega C$ )가 무부하포화곡선의 접선의 기울기(B직선의 기울기)보다 크도록 하는 것이다. 즉,

$$\frac{K}{\omega C} > B = \frac{V_n}{I_B} = \frac{V_n}{I_B} (1+\sigma) = \frac{KV_n}{I} (1+\sigma) = K z_s (1+\sigma) = 1+\sigma$$

여기서, 동기 임피던스  $z_s$  [pu] =  $1/K$ ,  $\omega CV = I$  (단자전류) =  $K I_f$ , 포화계수 $\sigma = (I_B - I_n)/I_n$ , B = 직선의 기울기

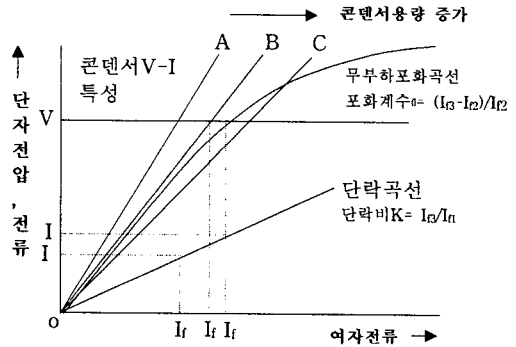


그림 3. 동기발전기의 무부하 포화특성 곡선

한편, 동기발전기와 콘덴서가 계통과 분리될 당시 선로의 선간전압이 V [kV] 일 때, 콘덴서의 3상 충전용량을 Q [MVA]라 하면,

$$Q = \omega CV^2, \quad \frac{1}{\omega C} = \frac{V^2}{Q}$$

로 되어 콘덴서의 충전용량 Q는 상기의 부등식으로부터 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$Q < \frac{KV^2}{(1+\sigma)}$$

이를 기준전압을  $V_n$ , 3상 기준용량을  $Q_n$  으로 하여 pu 단위로 환산하면,

$$Q [\text{pu}] = \frac{Q}{Q_n} = K \left( \frac{V}{V_n} \right)^2 \frac{1}{1+\sigma}$$

로 된다.

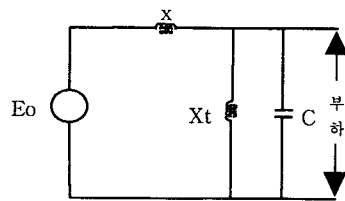


그림 4. 동기발전기의 자기여자현상 등가회로

(X : 동기리액턴스 + 변압기 누설리액턴스, X : 변압기 여자리액턴스, C : 역률보상용 콘덴서)

## 2.4 유도발전기의 자기여자현상

유도발전기의 회전자계를 만드는 여자전류는 고정자가 연결된 전원에서부터 공급받아야 하기 때문에 전력계통과의 상시병렬운전이 필요하다. 그런데, 여자전류는 지상(부하기준)의 무효전력으로서 유도발전기가 연계된 배전계통으로부터 공급받아야 하므로 연계 점의 역률이 낮아지게 된다. 따라서 이를 위해 역률보상용 콘덴서를 병렬

로 접속하여 역률을 보상하는 방식이 일반적으로 채용되고 있다. 그러나, 어떤 원인으로 인하여 부하가 없는 가운데 유도발전기와 무효전력보상용 콘덴서가 병렬로 연결된 채로 계통과 분리된 경우, 콘덴서의 지상전류가 여자전류로 되어 자속을 증가시킴에 따라 유도발전기의 무부하 포화특성 곡선과 콘덴서의 전압전류 특성과의 교점까지 전압이 상승하는 자기여자현상이 발생하게 된다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 분석

그림 5는 모델 배전계통으로 간선의 총 길이가 26.7km이고, 28개의 노드와 5개의 분기선을 가진 중압거리 선로서, 이를 11개의 노드로 축약하였다. 이 고압계통은 실 계통 선로를 모방하여, 최대한의 가혹한 조건을 추가로 상정하여 대상 모델 계통을 구성한 것이다.

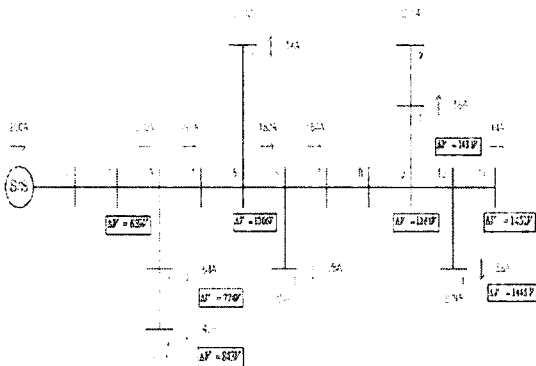


그림 5. 모델 배전계통 (축약계통)

그림 5의 축약계통 11번 지점에 1,000KVA의 풍력(유도발전기)이 도입되는 경우, 유도발전기의 기동 시 돌입전류가 표 1과 같이 허용치 이내로 유지됨을 알 수 있다. 허용치( $0.9984 \leq V_{L, Pcc, Pti} \leq 1.0513$ )는 송출전압이 -1%에서 4%로 변동한다고 가정하여 계산한 값이다. 따라서 돌입전류에 의한 배전계통의 연계조건을 만족함을 알 수 있다.

표1. 유도발전기의 기동 시 돌입전류 분석결과

구간번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
단락용량(pu)	4.8	1.3	1.2	0.9	0.8	0.6	0.69	0.66	0.60	0.44	0.39
누적 단락용량(pu)	4.8	6.1	7.3	8.2	9.0	9.7	10.	11.	11.	12.	12.
연계TR용량(KVA)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1500
연계TR Z(pu)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.33
유도발전기 용량(KVA)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000
발전기 내부%Z(PU)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000
연계계기동시 전압											0.99
양부판정											0

한편, 11번 구간에 1,000KVA의 풍력(유도발전기)이 도입되는 경우, 커패시터에 의한 공진현상은 표 2와 같이 계산된다. f1과 f2의 차이가 1보다 훨씬 큰 값을 가지므로 배전계통의 연계조건을 만족함을 알 수 있다.

표2. 커패시터에 의한 공진현상 분석결과

구간 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
f1	5.4										
f2											3.9
f1 - f2 I											1.6
양부판정											0

또한, 11번 구간에 1,000KVA의 풍력발전기(유도기)가 도입되는 경우, 자기여자현상에 대한 결과는 표 3과 같다.  $Q < \frac{\sqrt{3} V_{nI} R}{1 + \sigma}$  값을 비교하여 양부를 판정한 결과, 연계조건을 만족하지 않음을 알 수 있다. 따라서 수용가의 역률 보상기 용량(Q=100KVAR)을 100KVAR 보다 작은 값으로 설정해야 함을 알 수 있다.

표3. 유도발전기 자기여자현상 분석결과

구간 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
역률보상용량[VA]	100,000										
포화계수	0.46										
무부하시 여자전류	0.125										
정격전압[V]	6600										
자기여자 값	148/29	148/29	148/29	148/29	148/29	148/29	148/29	148/29	148/29	148/29	148/29
양부판정	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

### 4. 결론

상기의 분석 결과에서 알 수 있듯이 4개의 항목 중 유도발전기의 자기여자현상에서 계통의 연계조건을 벗어나 판정결과가 불량으로 판정되었기 때문에, 해당 분산전원의 연계가 불가능함을 알 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사 전력연구원 "배전전압관리 개선에 관한 연구", 최종보고서 2004. 3.
- [2] 분산전원 배전계통 연계기술기준, 한국전력공사 2005. 4.
- [3] 분산형 전원 배전계통연계 업무지침, 한국전력공사 2005. 4.
- [4] IEEE 1547.1 "IEEE Standard conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems" 2005. 1.
- [5] 일본 북해도전력 분산형전원 연계업무 절차서 및 기술해설서 2002.