

유도발전기 불평형 운전시 동작특성 해석

김종겸, 김준호, 이은웅
원주대학, 충남대학, 충남대학

Analysis of Characteristics for Induction Generator under the Unbalance Operation

Kim Jong-Gyeum, Kim Jun-Ho, Lee Eun-Woong
Wonju National College, Chungnam Univ

Abstract - 에너지의 대부분을 해외에서 수입하여 사용하는 우리나라의 경우 청정에너지를 개발하여 사용하는 것이 매우 중요하다. 소수력은 무공해 에너지를 생산하는 것으로서 주로 용량이 작은 발전소를 건설 운영하는 것이 현실적이다. 이와 같은 소수력 발전소의 건설 후 운영에 사용되는 발전기는 가격이 저렴하고 운영이 편리한 유도발전기가 대부분을 차지하고 있다. 소수력의 발전소 2차 전압은 주로 22.9kV로 일반 배전계통에 연계 사용하는 것이 일반적이다. 배전계통의 경우 단상과 3상을 혼합하여 사용하는 경우가 많아 전압 불평형에 의한 여러 가지 문제를 발생하고 있다. 3상 4선식 배전시스템에 연결하여 사용할 수 있는 유도발전기에 대해 수용가 부하의 변동에 따라 어떤 특성변화를 하는지를 전압 불평형율의 변화에 따른 특성해석을 실시하였다.

1. 서 론

우리나라는 에너지 사용량의 97[%]를 외국으로부터 수입하고 있으므로 정부에서는 신재생 에너지 보급을 높이기 위해 여러 가지 에너지 개발원을 개발 보급하고 있다. 소수력의 경우 다른 신재생에너지에 비해 국내 부존잠재량이 높아 개발치가 높지만 개발되지 않고 잠재되어 있는 에너지가 1.5[M]정도가 된다고 알려져 있다[1]. 소수력 발전설비는 3,000[M]미만으로 정의되었지만, 관련법의 개정으로 1만[M]이하의 수력발전설비를 말하는 것으로서 국내 대부분의 발전설비가 해당되고 있다.

우리나라 소수력 개발은 주로 소하천을 이용한 발전이 대부분이었으나 환경 또는 민원문제로 인해 대응량보다는 중소형 형태로, 발전량이 높지 않아 주로 인근지역의 배전계통에 연계하는 것이 보편적이다. 따라서 이와 같은 이유로 인해 유지보수가 쉽고 여자소스를 구하기 쉬운 유도발전기를 많이 채택하고 있다.

유도발전기는 유도전동기와 같은 구동원리로 회전속도가 동기속도 이상에서 발생하는 전압을 이용한 것으로서 우리나라 소수력 발전소의 많은 곳에서 설치 운영되고 있다.

용량이 작은 발전소를 건설 운전하는 경우 발전된 전력을 배전계통에 연결할 때 22.9[kV]의 3상 4선식 선로에

연결하여 사용하는 편리하다. 그러나 3상 4선식 계통에서는 단상 및 3상 부하가 함께 사용되므로 각상의 전류 분담이 일정하지 않을 경우 발전기에 전압 불평형이 발생할 수 있다. 전압 불평형은 바로 전류 불평형으로 이어져 기기의 손실증가와 유도전동기의 경우 맥동 토크의 발생으로 소음증가 및 베어링의 마모를 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 유도 발전기로 사용하는 경우 계통의 부하가 일정하지 않을 경우 발생할 수 있는 전압 불평형을 가정하여 유도발전기의 고정자에 흐르는 전류 및 자속의 불평형과 축 부분의 베어링에 영향을 줄 수 있는 토크 특성에 대해 분석하고자 한다.

2. 불평형 및 전자계 과도해석 프로그램

2.1 전압 및 전류 불평형

전압 불평형율은 식 (1)과 같이 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2) 또는 영상분(V_0)의 비율로서 정의하고 있다. 역상분 전압은 대개 회로내 흐르는 불평형된 부하의 역상분 전류에 의해 주로 발생한다. 영상분을 전압 불평형율 산정에 고려할 경우에는 반드시 3상이 대칭이어야 한다.

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

일정기간동안의 전압 불평형율을 찾아내기 위해서는 각 상의 선간전압의 크기만으로 계산이 가능한 식 (2)와 같은 관계식을 이용한다. 식 (2)는 각 상의 선간전압만 알 경우 전압 불평형율을 쉽게 구할 수 있으므로 가장 널리 이용하고 있다[2-4].

$$VUF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\gamma}}{1 + \sqrt{3 - 6\gamma}}} \quad (2)$$

식 (2)에서 γ 는 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2}$$

전류 불평형율은 각상에 흐르는 전류를 식 (3)과 같이 구하면 쉽게 찾아낼 수 있다.

$$CUF = \frac{A - \sqrt{3A^2 - 6B}}{\sqrt{6B - 2A^2}} \quad (3)$$

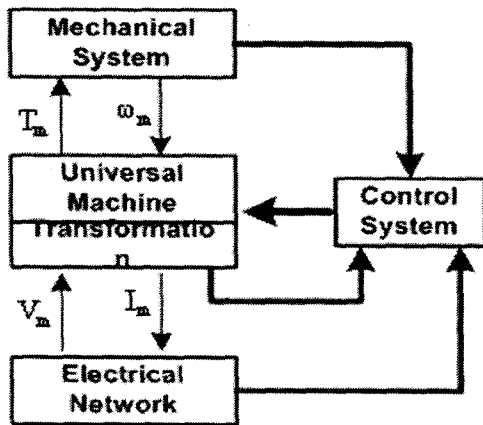
식 ③에서 A와 B는 다음과 같다.

$$A = I_a^2 + I_b^2 + I_c^2$$

$$B = I_a^4 + I_b^4 + I_c^4$$

2.2 전자계과도해석 프로그램

전자계과도해석 프로그램(EMTP)에서 회전기기는 동기, 직류기 및 유도기를 취급할 수 있는 12개의 서브루틴(UM)을 가지고 있다. 특히 가변속 드라이브 구동 계산을 위한 인터페이스 모델은 그림 1과 같이 전기적인 회로망(EN), 기계적인 시스템(MS), 제어시스템(TACS), 회전기(UM)의 4 가지로 구성되며, 전기적인 인터 페이스는 좌표변환을 통해 이루어지고, 기계적인 시스템은 표 1과 같이 회전기기와 인터 페이스 전에 전기적인 등가회로로 바꾸어야 한다.

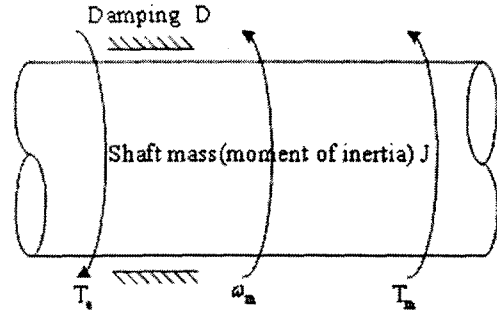


〈그림 1〉 UM 인터페이스 변수 개략도

〈표 1〉 전기계와 기계계의 인터페이스

| Mechanical | Electrical |
|--------------------------------|-------------------------------|
| T(torque on mass) | i(current into node) |
| ω _m (angular speed) | v(node voltage) |
| θ _m (angle) | q(capacitor charge) |
| J(moment of inertia) | c(capacitance to ground) |
| K(spring constant) | 1/L(reciprocal of inductance) |
| D(viscous damping) | 1/R(conductance) |

그림 1과 같은 인터페이스 시스템을 전기계 결합 시스템으로 나타내면 그림 2와 같다. T_e는 전동기에서 발생하는 토크이고, 축에 연결된 부하 토크는 T_m이며, 회전 각속도는 ω_m이다. 또한 관성모멘트를 나타내는 J와 축에는 점성(Viscous)성분의 댐핑 상수 D도 존재한다.



〈그림 2〉 전기계 결합 시스템

전기계와 기계계로 결합된 그림 2와 같은 시스템에서의 기계적 운동방정식은 식 ④와 같다.

$$T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m + T_e$$

식 ④를 EMTP로 해석하기 위해 전기적인 회로로 바꾸면 식 ⑤와 같이 표현된다.

$$I_m = C \frac{dV_m}{dt} + \frac{V_m}{R} + I_e$$

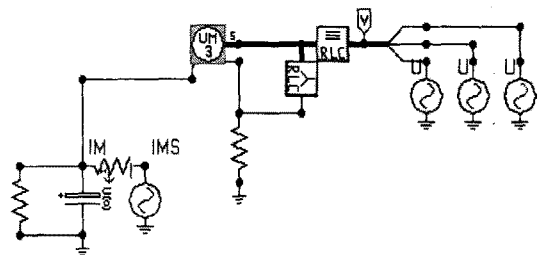
식 ⑤에서의 유도 전동-발전기의 전자계 토크는 식 ⑥과 같이 d 및 q 축 전류와 자속의 형태로 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (6)$$

따라서 전동기 관련 데이터 입력시 모든 변수는 전기계로 변환되어야 한다. 전자계 과도해석 프로그램으로 전동기와 발전기를 해석할 수 있는데 부하가 요구하는 부하 토크를 전기적인 변수로 변환할 경우 전동기는 부(-)로, 발전기는 정(+)으로 결과값이 나타난다.

3. 해석 및 결과분석

부하의 변동에 따른 유도발전기의 동작 특성 해석을 위해 그림 3과 같이 계통의 부하는 전압원의 변화로 가정하여 간략화된 모델을 사용하였다. EMTP로 유도발전기의 특성해석을 위해서는 전동기의 회전방향을 반대로 하기 위해 입력 전압중 2상의 상회전 방향을 반대로 사용하였다.



〈그림 3〉 간략화된 해석 모델

그림 3에서 좌측은 유도발전기를 나타낸 것이고, 오른 쪽은 부하측에 공급하는 배전시스템을 나타낸 것이며, 부하의 변동에 따라 발전기의 고정자 전류와 자속 그리고 토크 변화를 모의하였다. 본 연구에 사용된 유도발전기의 파라미터는 표 2와 같다.

〈표 2〉 유도발전기 사양

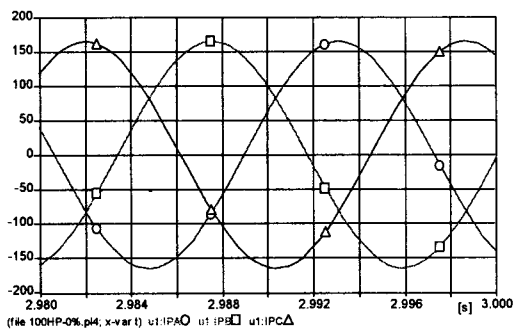
| | |
|-------------------------------------|---------------------------|
| parameter | 380[V], 4p, 100HP 60Hz |
| stator resistance, r_s | 0.095[Ω] |
| rotor resistance, r_r | 0.075[Ω] |
| stator leakage inductance, L_{ls} | 0.0005[H] |
| rotor leakage inductance, L_{lr} | 0.0005[H] |
| mutual inductance, L_m | 0.016[H] |
| Inertia moment, J | 5.0[kg·m ²] |
| Friction coefficient, B | 0.075[Nm·s] |

부하의 변동에 따른 특성해석을 위해 그림 3의 입력원에 인가되는 전압은 표 3과 같이 3상의 크기가 일정한 평형된 전압과 위상은 일정하나 선간전압의 크기가 다를 경우 불평형을 사용하였다. 계통 및 부하의 전압불평형율은 대개 3%이하이므로 이 값의 범위를 이용하여 특성 변화를 계산하였다.

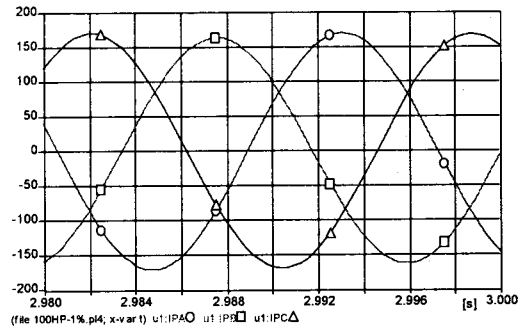
〈표 3〉 전압 불평형율의 크기

| V_{ab} [V] | V_{bc} [V] | V_{ca} [V] | VUF[%] |
|--------------|--------------|--------------|--------|
| 310.268 | 310.268 | 310.268 | 0 |
| 310.269 | 313.0 | 315.69 | 1 |
| 310.28 | 315.42 | 321.2 | 2 |
| 310.2 | 318.46 | 326.74 | 3 |

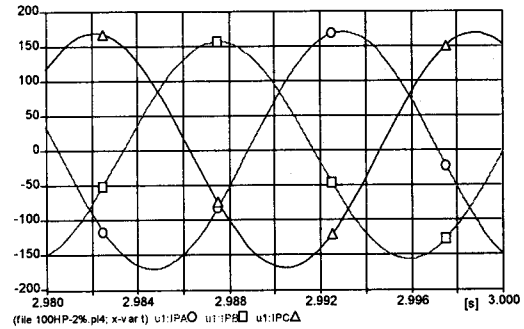
그림 4는 평형 및 전압 불평형시 유도발전기 각상의 고정자에 흐르는 전류 파형을 나타낸 것이다.



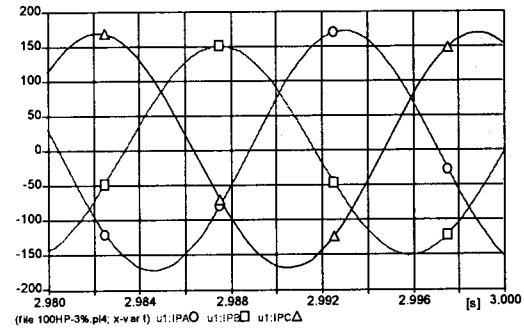
3상 평형시



1% 전압 불평형시



2% 전압 불평형시



3% 전압 불평형시

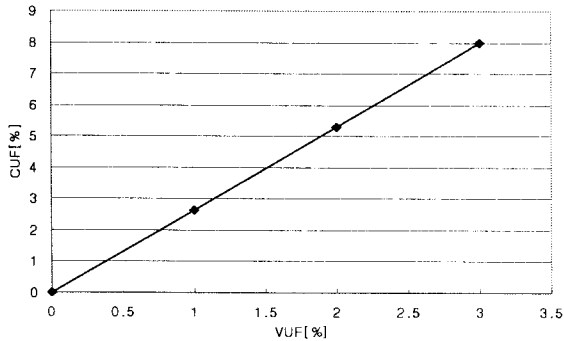
〈그림 4〉 평형 및 불평형 운전시 고정자 전류

표 3과 같은 전압조건하에서 그림 4(a)에서는 각상에 흐르는 전류의 크기는 일정하지만, 그림 4(b)~(d)에서와 같이 전압 불평형율이 증가함에 따라 3상의 전류값에서 각상 별로 약간의 전압 크기에 차이가 약간 증가함을 확인할 수 있다. 그림 4에 나타낸 최대 전류값을 가지고 식 3에 의해 전류 불평형율(CUF)을 구하면 표 4와 같다.

〈표 4〉 전류 불평형율

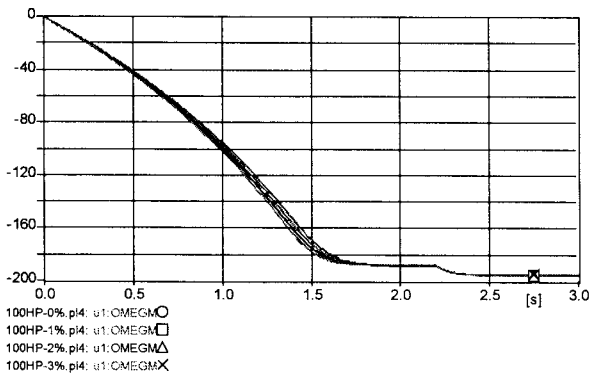
| I_a | I_b | I_c | CUF[%] |
|----------|----------|----------|--------|
| 165.0226 | 165.0226 | 165.0226 | 0 |
| 170.1213 | 163.6706 | 170.6085 | 2.643 |
| 171.0119 | 157.0425 | 169.5541 | 5.284 |
| 172.5378 | 151.0936 | 169.2635 | 7.994 |

그림 5는 전압 불평형율에 따른 전류 불평형을 나타낸 것으로서 전압 불평형율이 증가함에 따라 전류 불평형율은 거의 선형적인 증가를 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서 출력의 증감과 관계없이 전압 불평형에 따른 전류의 증가는 손실증가로서 발전기 출력 감소와 발전용량의 증가로 이어짐을 확인할 수 있다.



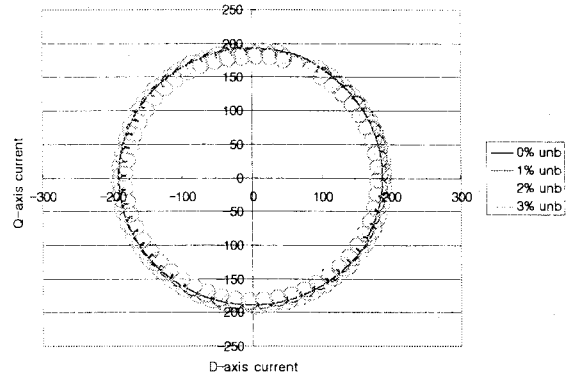
〈그림 5〉 전압 불평형에 따른 전류 불평형율

그림 6은 전압 불평형율의 변화에 따른 각속도의 변화를 전동기와 발전기 영역에서 비교한 것이다. 유도 전동기 영역에서는 각속도는 188[$\%$]이지만 부하의 연결 후 각속도는 195[$\%$]가 되므로 완전한 발전기 영역에서 운전함을 알 수 있다. 전압 불평형율의 크기에 따른 각속도의 변화는 정상상태에서 거의 없음을 알 수 있다.

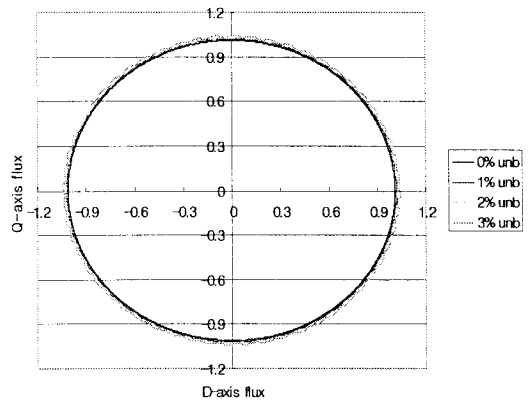


〈그림 6〉 전압 불평형율에 따른 각속도 변화

전압의 불평형은 전류의 불평형을 발생하는데 발전기의 경우 이들 불평형으로 인해 토크 특성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그림 7은 전압 불평형율에 따른 유도발전기 고정자의 d, q 축 전류 및 자속궤적을 나타낸 것으로서 이들 두 값의 벡터값은 토크의 특성변화에 그대로 이용할 수 있다.



전류궤적

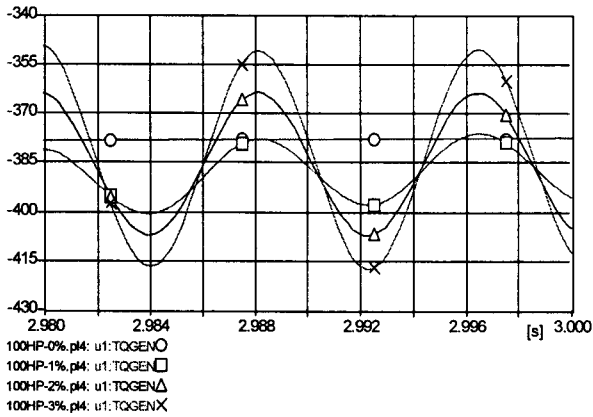


자속궤적

〈그림 7〉 전압 불평형율에 따른 전류 및 자속 궤적

그림 7에서 알 수 있듯이 전압 불평형율이 거의 없을 경우 전류 및 자속의 궤적은 리플성분이 없는 거의 완전한 원형형태의 궤적을 그리지만, 불평형율이 존재할 경우 d, q축 전류궤적은 평형시에 비해 불평형율이 증가할수록 기기에 손상을 일으킬 수 있는 맥동토크 성분의 회전형 궤적을 그리고 있음을 확인할 수 있다. 한편 자속궤적은 전압 불평형율이 증가함에 따라 궤적의 원 둘레가 약간 증가하고, 궤적에도 선형적인 변화가 아닌 불규칙적인 궤적을 형성함을 확인할 수 있다. 따라서 그림 7의 결과를 식 (6)에 적용할 경우 바로 전압 불평형에 따라 발전기 축에 발생하는 토크 형상을 찾아낼 수 있다.

그림 8은 정상 운전 상태에서 전압 불평형율의 변화에 따른 토크 변화를 나타낸 것이다. 3상 평형일 경우 토크는 일정하지만, 전압 불평형율이 증가할수록 토크 맥동성분이 점차 증가함을 확인할 수 있다. 이와 같은 맥동성분은 소음증가는 물론 베어링의 마모를 촉진시켜 유도발전기의 고장을 초래할 수 있다. 따라서 부하의 변동에 따른 전압 불평형율을 줄일 수 있는 방법의 연구 더욱 필요하다고 생각된다.



〈그림 8〉 전압 불평형을 변화에 따른 발전기 토크

4. 결 론

소수력은 국내 부존 잠재량에 비해서 경제성이 낮아 개발이 늦어졌지만 국제 유가의 급등과 신재생에너지 보급의 증가에 대한 관심의 증가로 발전가능성이 점차 높아지고 있다. 이와 같은 상황에서 중소형 위주의 새로운 소수력 발전시스템을 개발하여 이용할 경우 발생할 수 있는 문제점을 개선하기 위해 부하의 변동에 따른 유도발전기의 동작특성을 분석하였다.

3상 4선식 배전계통에 바로 연계하여 사용할 경우 부하의 변동에 따라 전압 불평형이 유도발전기의 고정자에 미치는 영향을 전압변동율의 변화율에 따라 해석하였다. 전류 불평형율이 증가하는 전압 불평형율의 증가에 비례한다는 것을 확인하였고, 전류 불평형율의 존재는 발전기의 축에 맥동토크를 발생시키는 전류 및 자속성분의 존재를 자속 및 전류 궤적으로 나타내었으며, 이와 같은 맥동 토크의 존재는 소음증가는 물론 베어링의 마모를 촉진시켜 발전기의 유지보수에 어려움을 초래할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 부하의 변동을 최소화할 수 있는 방법의 연구나 부하의 변동에도 유도발전기의 특성에 영향을 줄일 수 있는 연구 등이 필요할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이경배, 김영규, 백두현, 이은웅, "국내 소수력 발전 기술현황과 전망", 대한전기학회 2003 하계학술대회 논문집 B권, pp.762-764, 2003.07
- [2] 김종겸 외 3인, "불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작특성 해석", 대한전기학회 논문지, 53(B), No.6, pp. 372-379, 2004.06
- [3] 김종겸, 박영진, "3상 4선식 저압 수용가의 전압 불평형율 측정 분석", 한국조명전기설비학회 논문지, 제 18권, 6호, pp.91-99, 2004. 11
- [4] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of