

Characteristics Analysis of 3-phase Induction Generator at the Unbalanced Load Operation

金宗謙[†]
(Jong-Gyeum Kim)

Abstract - Hydro power supplies no pollution energy, mainly induction generator has been applied at the small capacity power station. The generating power of small hydro-electric power station connects on the 22.9kV distribution system or low voltage system in the case of three-phase four-wire supply system. There are side effects of various kinds in the 3-three phase 4-wire distribution system mixing 1-phase load and 3-phase load. This system generates the voltage unbalance by unbalanced load operating condition. They have various serious effects on generator and connection system.

In this paper, we analyzed what kind of operation characteristic are happened in the induction generator by customer load variation at the 3-three phase 4-wire distribution system.

Key Words : Current Unbalance Factor(CUF), Voltage Unbalance Factor(VUF), Induction Generator

1. 서 론

우리나라는 국내에서 사용하는 에너지 97% 정도를 외국으로부터 수입하고 있으므로 정부에서는 국내에서 가용 가능한 에너지 보급률을 높이기 위해 신재생 에너지 등 다양한 에너지원을 개발 보급하고 있다. 소수력의 경우 청정 에너지원으로 다른 신·재생 에너지에 비해 국내 부존 잠재량이 높아 개발가치가 높은 것으로서 아직 개발되지 않고 잠재되어 있는 에너지가 1.5[MW]정도가 된다고 알려져 있다 [1]. 소수력 발전설비는 1만[kW]이하의 수력발전설비를 말하는 것으로서 국내 대부분의 발전설비가 해당될 수 있다.

소수력 에너지 개발은 주로 소하천을 이용한 것이 대부분이었으나 개발에 장애가 되는 환경 또는 민원문제에 의해 대용량보다는 중소형 위주로 진행되고 있고, 발전량이 크지 않아 대형 송전계통보다는 주로 배전계통 또는 수용가 저압설비에 연결 사용하는 경우가 많아지고 있다.

소수력의 경우 발전된 전력을 계통에 연결할 때 22.9[kV]의 3상 4선식 선로에 연결하여 사용하는 편리하다. 3상 4선식 계통에서는 단상 및 3상 부하가 함께 사용되므로 각상의 부하분담이 일정하지 않을 경우 전압 불평형이 발생할 수 있다. 이와 같은 불평형 전압 및 전류는 발전기에서 발생하여 부하에 공급하는 전력의 흐름에도 영향을 줄 수 있다.

따라서 본 연구에서는 유도 발전기로 사용하는 곳에서

계통의 부하가 일정하지 않을 경우 전압 및 전류 불평형에 의해 전력, 발전기 토크 및 역률 등에 어떤 영향을 미치는지를 해석하였다.

2. 전압 불평형과 p-q 전력성분

2.1 전압 및 전류 불평형률

3상 시스템에서 부하가 변동할 경우 임피던스의 변화로 인해 전류 및 전압의 불평형이 발생한다. 전압 불평형이 발생할 경우 전류 불평형으로 손실 증가는 물론 시스템의 동작을 불안정하게 한다. 그래서 중요한 설비에서는 전압의 불평형율을 1[%] 이내, 일반 설비에서도 1~3[%] 이내로 제한하고 있다[2,3].

전압 불평형률(VUF)은 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.

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

전압 불평형을 찾아내기 위해서는 각 상의 선간전압의 크기만으로 계산이 가능한 식 (2)와 같은 관계식을 이용한다. 식 (2)는 각 상의 선간전압만으로 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.

[†] 교신저자, 正會員 : 江陵大 電氣情報通信工學部 教授 · 工博
E-mail : jgkim@kangnung.ac.kr

接受日字 : 2007年 3月 31日

最終完了 : 2007年 5月 02日

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

부하 불평형 운전을 의미하는 전류 불평형율(CUF)은 각 상에 흐르는 전류로 식 (3)과 같이 구하면 쉽게 찾아낼 수 있다.

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

식 (3)에서 A와 B는 전류로서 다음과 같다.

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

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

2.2 p-q 전력 성분[4,5]

p-q 이론은 시간영역에 기초한 것으로서 전압, 전류의 정상 및 과도상태에 대한 것도 표현할 수도 있고, 평형 또는 불평형, 고조파의 포함여부에 관계없이 3상 전력시스템의 동작의 이해를 쉽게 하는데 매우 편리하다.

그림 1은 전원과 부하측 전력의 흐름을 나타낸 것이다. p-q의 전력성분은 α-β-0 좌표에서 전압과 전류로부터 계산할 수 있다. 각 전력성분은 실질적인 의미를 나타내는 직류와 교류 값으로 분리할 수 있다.

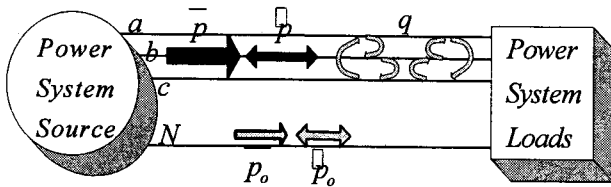


그림 1 p-q 이론 전력 성분
Fig. 1 p-q theory power components

p-q 이론은 a-b-c 좌표에서 정지 기준 시스템을 α-β-0 좌표를 가진 시스템으로 변환한 것으로서 α-β 좌표는 서로 직각이고, 좌표 0은 영상분 요소와 일치한다. 여기서 계산한 영상분 요소는 대칭 성분 변환에 의해 얻은 것과는 다르다. α-β-0 좌표에서의 전압과 전류는 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

그림 1에서의 순시유효전력(p)은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \quad (5)$$

식 (5)에서 \bar{p} 는 순시 유효전력의 평균값이다. 이 값은 전

원측에서 부하로 a-b-c 좌표를 통해 전달되는 단위 시간당 에너지와 일치하는 것으로 전원측에서 공급되어야 할 유일한 전력성분이다. 한편 \tilde{p} 는 순시 유효전력의 교번 값으로 a-b-c 좌표를 통해 전원측과 부하측 사이를 교환하는 단위 시간당 에너지이다. \tilde{p} 는 전원에서 부하로 어떤 에너지 전달도 달성하지 못하는 전력성분이기 때문에 보상이 되어야 한다.

순시무효전력(q)은 부하에서 전원측으로 에너지가 이동하는 개념을 의미하는 것으로서 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta = \bar{q} + \tilde{q} \quad (6)$$

식 (6)에서 순시무효전력 q는 시스템상 서로 교환되는 전력 즉, 대응되는 바람직하지 못한 전류와 관련 있는 것으로서 전원측과 부하측 사이 에너지의 상호 이동을 나타낸 것으로서 실질적인 에너지의 전달은 없다.

부하에 사용되는 유효분과 사용되지 않고 전원측과 부하측 사이를 왕래하는 무효전력성분의 벡터합인 피상전력(s)은 식(5)와 (6)의 벡터합으로 식 (7)과 같다.

$$s = p + jq = \sqrt{p^2 + q^2} \quad (7)$$

부하에 사용되는 전력성분에 대해 유도발전기에서 공급되는 전력성분의 비율을 역률로 환산할 경우 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$pf = \frac{p}{s} \quad (8)$$

3. 시뮬레이션 및 결과 분석

그림 2는 수용가 부하의 변동에 따라 3상 유도발전기가 어떤 동작변화를 하는지 해석하기 위해 EMTP 프로그램의 ATP Draw를 사용하여 나타낸 것이다[6]. 그림 2에서 좌측은 유도발전기 부분이고, 오른쪽은 부하측에 대한 것으로서 부하의 변동에 따라 유도발전기에서의 유효, 무효, 피상 전력변화와 역률 등의 변화를 확인하기 위해 전압 불평형율을 고려하였고 이때 유도발전기에서 발생하는 토크 변화도 모의하였다.

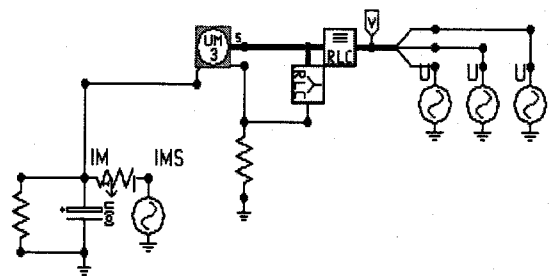


그림 2 간략화 한 해석모델
Fig. 2 Simplified analysis model

본 연구에 사용된 3상 유도발전기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 유도발전기 사양
Table 1 Specification of induction generator

parameter	380[V], 4p, 100HP
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 · rad/s]

그림 2의 입력원에 인가되는 전압은 표 2와 같이 3상의 크기가 일정한 평형된 전압과 위상은 일정하나 선간전압의 크기가 다를 경우 전압 및 전류 불평형을 계산한 것이다. 계통의 전압 불평형율은 대개 3%이하이므로 이 값의 범위 이내를 이용하여 계산하였다.

표 2 전압 및 전류 불평형율의 비교
Table 2 Comparison of VUF & CUF

V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	VUF [%]	I_a	I_b	I_c	CUF [%]
310.26	310.26	310.26	0	165.022	165.022	165.022	0
310.26	313.0	315.69	1	170.121	163.670	170.608	2.643
310.28	315.42	321.2	2	171.012	157.042	169.554	5.284
310.2	318.46	326.74	3	172.538	151.093	169.263	7.994

그림 3은 전압 불평형율에 따른 발전기 고정자에 흐르는 전류값을 사용하여 불평형을 나타낸 것으로서 전압 불평형율이 증가함에 따라 전류 불평형율은 거의 선형적인 증가를 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서 출력의 증감과 관계없이 전압 불평형율이 높아짐에 따라 전류 불평형율이 상대적으로 높아져서 손실이 높아지기 때문에 발전기 출력감소와 발전기의 설계 용량증가로 이어짐을 확인할 수 있다.

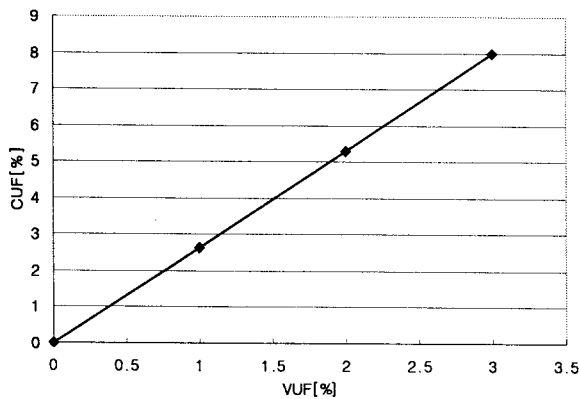


그림 3 전압 불평형에 따른 전류 불평형율
Fig. 3 CUF by voltage unbalance

그림 4는 부하가 일정한 경우 각상의 유도발전기에서 공급되는 순시전력을 나타낸 것이다. 기동시는 기동 전류의 영향으로 순시전력이 높지만, 전력을 공급할 수 있는 순간 부터는 일정한 크기의 전력을 발생하고 있다. 순시전력은 정 또는 부의 값을 나타내는데 부의 값은 부하에 공급되는 유효전력 성분이고, 정의 값은 부하에서 전원측으로 역으로 흘러 들어가는 무효전력 성분을 의미한다. 그림 4에서 Y축 단위는 [kW]이다.

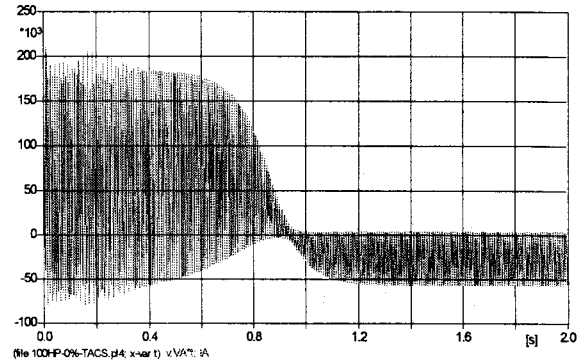
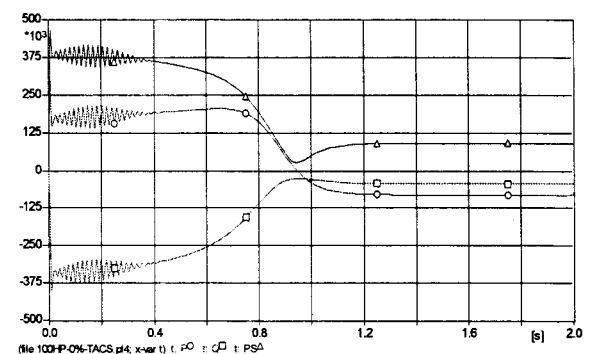


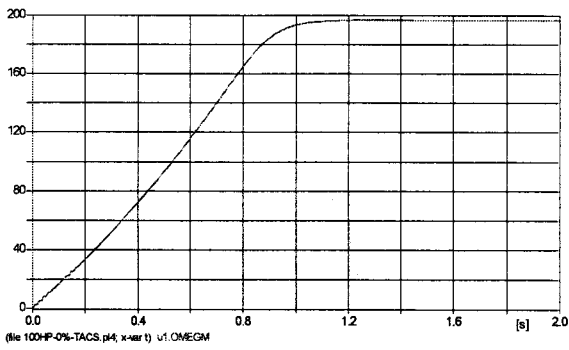
그림 4 평형시 순시전력
Fig. 4 Instantaneous power at balanced condition

그림 5는 부하 변동이 없는 즉, 전압불평형이 존재하지 않는 경우에서의 전력, 각속도, 전류 및 토크의 변화를 모의한 것이다.

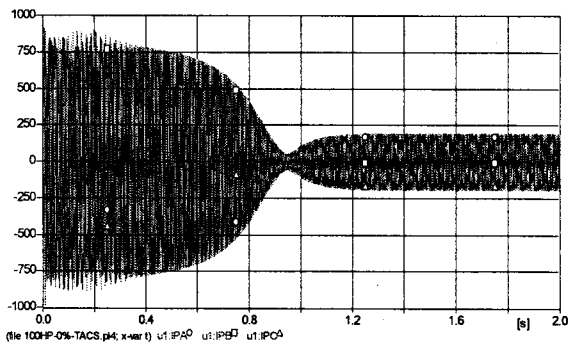
그림 5(a)에서 나타내고 있는 각 값들 중에서 유효전력 (○:P), 무효전력(□:Q) 그리고 피상전력(△:PS)을 의미하고 있다. 기동후 정상속도에 도달하기 까지 전력의 크기는 매우 높게 나타남을 알 수 있다. 그림 5(b)에서 기동 후 1.2[s]부터 196.87[%]의 각속도로 유도발전기로 운전함을 알 수 있다. 그림 5(c)는 유도발전기의 기동에서 정상운전까지의 고정자 전류를 나타낸 것으로서 3상의 위상차 120도 차이만 존재하고 전류 불평형이 존재하지 않는 일정한 값을 나타내고 있다. 그림 5(d)는 유도발전기의 토크를 나타낸 것으로서 유도전동기 영역에서는 부(-)의 값을 나타내지만, 발전기 영역으로 전환한 후에는 양(+)의 토크 값을 나타내며, 크기는 456.21[Nm]로서 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 그림 5(e)는 역률을 나타낸 것으로서 기동시는 낮은 역률을 나타내지만, 정상적인 발전기 영역에서는 88[%]의 안정된 값을 유지하고 있다.



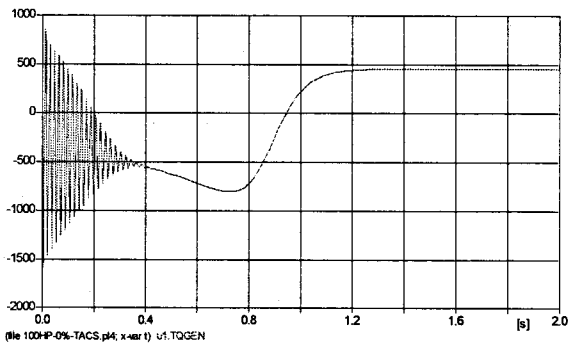
(a) Active(○), reactive(□) & Apparent power(△)



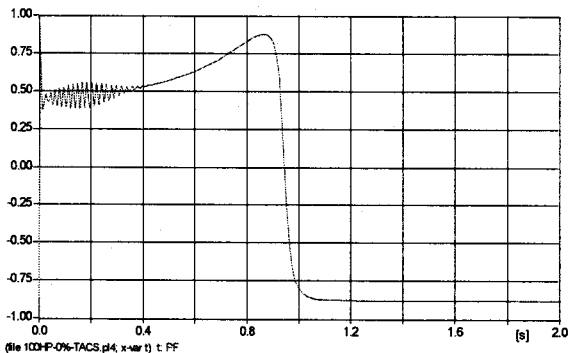
(b) Angular velocity



(c) Stator current



(d) Torque



(e) power factor

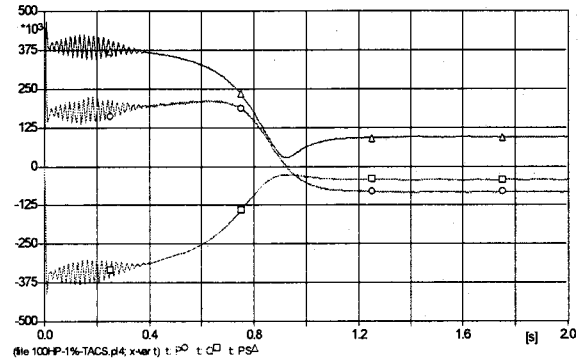
그림 5 평형부하 운전시의 동작 특성

Fig. 5 Operating characteristics at balanced load condition

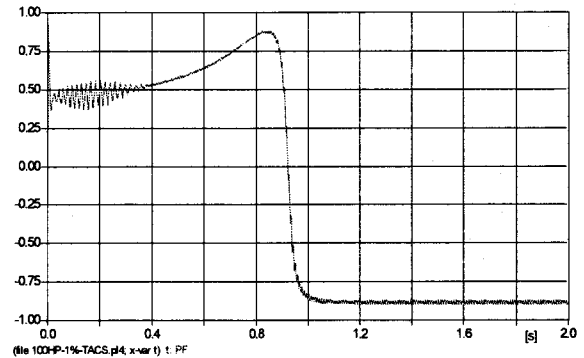
부하의 변동이 없는 일정한 조건하에서 유도발전기를 사용하는 경우가 가장 바람직하지만, 실제로 순간적인 부하의 변동이 발생하기 때문에 안정적인 운전은 매우 어렵다. 따

라서 부하의 변동시 나타날 수 있는 여러 가지 특성해석이 중요하다. 그림 6~8에서는 부하의 변동조건하에서 전압 불평형율을 1~3%로 변화하는 경우에 대해 유도발전기의 특성 변화를 나타낸 결과이다.

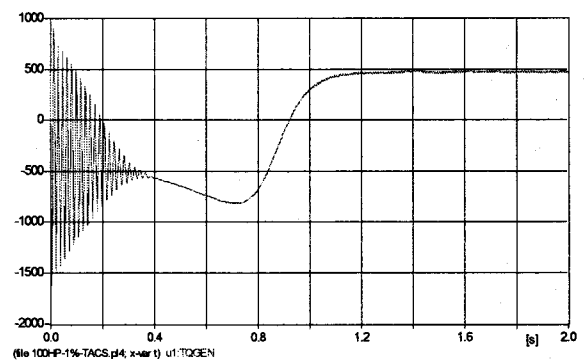
그림 6은 1%의 전압 불평형시 전력, 역률 및 토크 변화를 모의한 결과이다.



(a) Active, reactive & Apparent power



(b) power factor



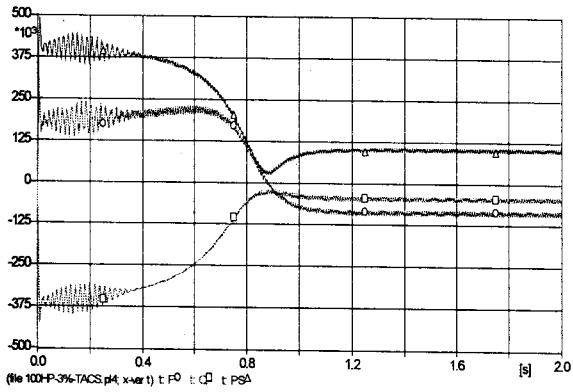
(c) Torque

그림 6 1% 전압 불평형시 동작 특성

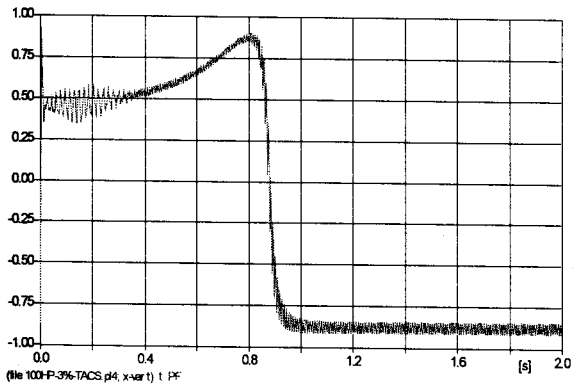
Fig. 6 Operating characteristics at 1% voltage unbalanced condition

그림 6(a)에서 유도전동기 운전영역과 발전기 영역에서의 전력변화는 불평형이 존재하지 않는 경우에 비해 순간적인 맥동형태를 나타내고 있다. 또한 그림 6(b)와 (c)의 역률과 토크특성에서도 같은 형태를 나타내므로 유도 발전기의 축에는 상당한 스트레스로 작용할 수 있다.

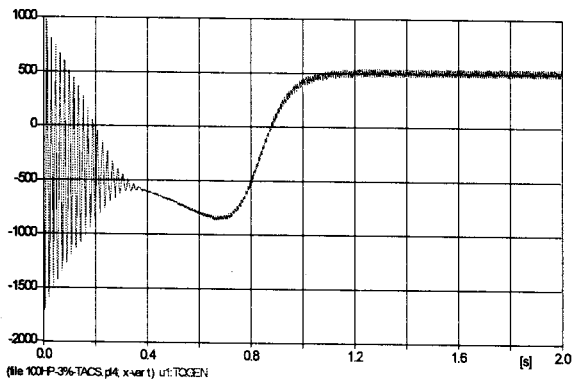
그림 7은 3% 전압 불평형시 전력, 역률 및 토크 특성을 모의한 결과이다.



(a) Active, reactive & Apparent power



(b) power factor



(c) Torque

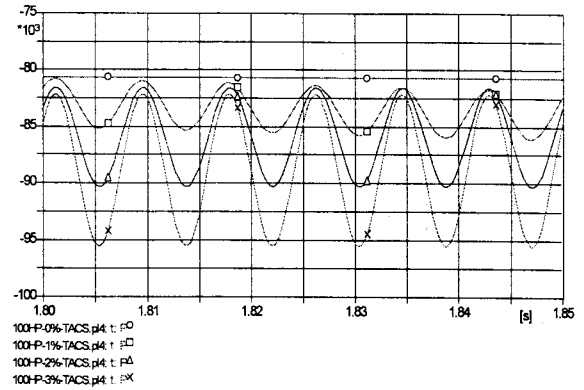
그림 7 3% 전압 불평형시 동작특성

Fig. 7 Operating characteristics at 3% voltage unbalanced condition

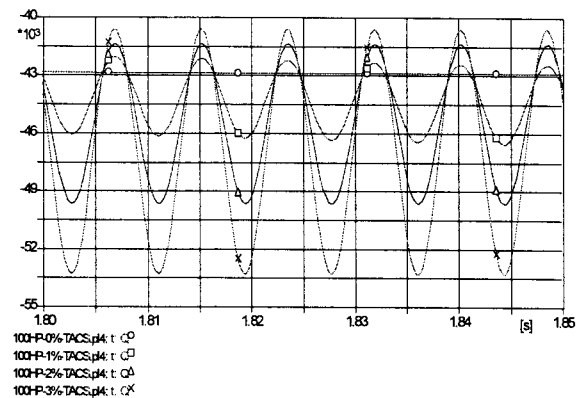
그림 7에서도 앞에서의 결과와 같은 형태를 나타내지만, 전력, 역률 그리고 토크의 맥동 정도는 점차 높아짐을 확인할 수 있다.

그림 5(a)과 같이 부하가 일정할 경우 전력은 순간적인 편차를 발생하지 않고 일정한 값을 유지하지만, 그림 6(a) 및 7(a) 같이 부하의 변동이 높아 전압 불평형이 커질 경우 순시전력의 편차가 점차 높아짐을 확인할 수 있다.

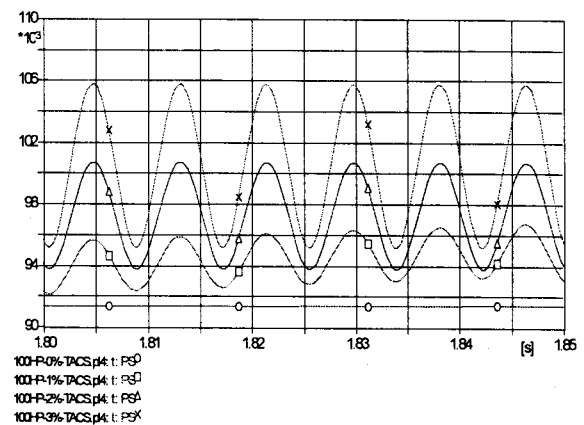
그림 8은 전압 불평형율의 변화에 따라 유도발전기를 정상 상태에서 운전하는 경우 순시 유효, 무효 및 피상전력의 변화를 나타낸 것이다.



(a) Instantaneous active power



(b) Instantaneous reactive power



(c) Instantaneous apparent power

그림 8 전압 불평형율에 따른 순시전력

Fig. 8 Instantaneous power by VUF

그림 8에서와 같이 전압 불평형율이 존재하지 않는 경우에는 일정한 전력값을 나타내지만, 전압 불평형율이 높아짐에 따라 순시 전력의 최대와 최소값에 대한 진동폭이 점차 높아짐을 확인할 수 있다.

그림 9는 전압 불평형율에 따라 유도발전기의 역률변동을 나타낸 것이다. 전압불평형이 존재하지 않는 조건에서는 역률이 88%이지만, 3% 전압 불평형일 경우 84.6~91.6%로 변화함을 확인할 수 있다. 따라서 전압 불평형율이 존재할 경우 역률을 일정하게 유지하기 위한 별도의 대책이 필요하다.

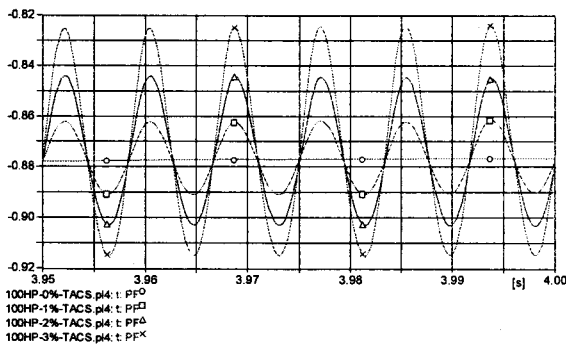


그림 9 전압 불평형률에 따른 역률
Fig. 9 Power factor by VUF

그림 10은 전압 불평형률이 없는 경우와 변화가 존재할 경우 정상운전시의 토크 변화를 나타낸 결과이다.

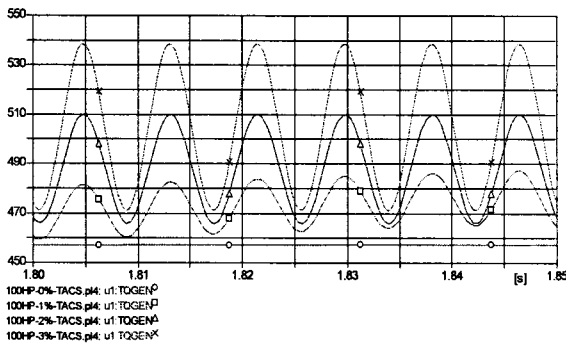


그림 10 전압불평형률에 따른 토크
Fig. 10 Torque by VUF

그림 10에서와 같이 전압 불평형률이 높아짐에 따라 토크의 맥동 성분이 증가하므로 축에 상당한 스트레스로 작용할 수 있다. 발전기에서 토크의 큰 편차는 베어링에 가장 큰 손상요소가 될 것이다. 따라서 이와 같은 부하의 변화에도 전력의 순간적인 편차를 최소화할 수 있는 시스템의 도입이 매우 중요하다.

부하의 불평형 운전에 의해 발생한 전압 불평형 운전시 유도발전기에 나타나는 전력, 토크, 역률의 변화를 표 3에 나타내었다. 표 3에서와 같이 불평형률이 증가할수록 전력, 토크 및 역률의 변동의 커진다는 것을 확인할 수 있다.

표 3 운전특성 결과

Table 3 Results of operation characteristics

구분	유효전력 [W]	무효전력 [VAR]	피상전력 [VA]	토크 [Nm]	역률 [%]
평형	80,693	42,861	91,377	457	88
1%VUF	81,352~	42,222~	92,793	464~	87.1~
	85,746	46,347	~96,324	486	89.5
2%VUF	81,572~	41,362~	93,791~	466~	85.8~
	90,315	49,644	100,730	509	90.6
3%VUF	82,137~	40,611~	95,202~	471~	84.6~
	95,505	53,261	105,780	538	91.6

4. 결 론

소수력발전에 사용되는 유도발전기의 운전시 부하의 변동에 따른 영향을 해석하였다. 부하의 변동은 전압의 불평형을 초래하여 전력변화를 발생시킨다. 이들 전력의 변화를 p-q전력이론의 소개를 통해 실제 유도발전기에 적용하여 모의하였다.

부하의 변동시 순시전력의 편차는 점차 높아져 정상적인 운전시 아주 짧은 시간에도 전력값의 편차가 심해 유도발전기에 진동, 소음 및 베어링 고장을 일으킬 수 있을 정도의 크기가 발생함을 확인할 수 있었다. 따라서 부하의 변동에서 발전기가 항상 일정하게 운전하기 위해서는 설계시는 물론 운전시 부하의 분배가 일정하게 되도록 조정될 필요가 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 이경배, 김영규, 백두현, 이은용, "국내 소수력 발전기술 현황과 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] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of voltage unbalance," IEEE Power Eng. Rev. Mag., vol.5, pp.50~51, May 2001.
- [4] 김종겸, 김준호, 이은용, "유도발전기 불평형 운전시 동작특성 해석", 2006 대한전기학회 전문대학교육위원회 발표논문집, pp. 126-130, 2006.10.20
- [5] Akagi, H et al., "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," IEEE Trans on IA, Vol.20, no.3, pp.625-630, 1984
- [6] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)," BPA 1986

저 자 소 개



김 종 겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1991년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 졸업 공학박사. 1996년~현재 국립 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수. 현재 당학회 B부문

편집위원 및 재무이사, P부문 편집위원장

Tel : 033-760-8474

E-mail : jgkim@kangnung.ac.kr