

교류발전기 병렬운전시 과도현상 해석에 관한 연구

오세진* · 김현수* · 김성환**

A Study on the Transient Phenomenon Analysis at the instant of Parallel Running for A. C. Generators

S-G Oh* · H-S Kim* · S-H Kim**

Key words : Short-circuit(단락), Synchronizing(동기화), Mechanical torque(기계적 토크),
Transient Phenomenon(과도현상)

Abstract

It is common knowledge amongst electrical and marine engineers that short-circuit in electrical system may cause large mechanical torque on generator and prime mover. However, it is not so widely known that the faulty synchronizing of generators may cause even higher torques than that of short-circuit. In this study, the transient phenomena related to the parallel running of synchronous generators are analyzed and the exact computer simulation method is proposed. In result, maximum transient torque and current take place in case of 120° voltage angle difference between Master and Slave and that may develop higher torque than the short-circuit according to a condition of synchronizing. When synchronizing in power system using only two generators higher torque and current occur to Master, but using multimachine system those occur to Slave. The short-circuit of marine generator does not happen frequently but faulty synchronizing sometimes takes place, therefore, it is necessary for designers to consider these phenomena.

1. 서 론

대규모의 전력은 동기기라 불리는 3상 교류발전기에 의하여 생산된다. 발전기 고정자권선의 극수는 회전자에 자극수와 일치시켜 고정자에 배치되

며 균일한 3상 전압을 발생한다. 자극이 설치되어 있는 회전자는 원동기에 의해 일정한 속도로 회전하며 계자권선에는 직류전류를 공급하여 여자시킨다. 회전자에는 한 개 혹은 그 이상의 단락권선을 가지고 있어 발전기 상태변화시 안정성을 증가

* 한국해양대학교 대학원 기관공학과(박사과정)

** 한국해양대학교 선박전자기계공학부

시키는데 이를 제동권선이라 한다. 계자권선에 직류전류를 공급하는 방법에는 슬립링을 통하는 방법과 회전자와 동축에 연결된 회전전자 발전기에 의한 방법이 있는데 최근에는 후자의 방법인 브러시리스 방법이 널리 사용된다.

발전기의 회전자에는 원통형과 돌극형이 있는데 원통형은 고속회전 발전기에 사용하며 돌극형은 저속회전 발전기에 사용된다. 원통형 회전자는 공극이 균일하며 고속회전시 원심력의 영향이 크므로 직경은 작고 축방향 길이가 긴 형태를 취한다. 반면 돌극형 회전자는 공극이 불균일하게 되며 저속회전시에는 원심력의 영향이 적으므로 직경은 크고 축방향 길이는 짧은 형태를 취한다.

발전기에는 전기적인 단락, 접지사고 및 병렬운전시의 동기화실패 등으로 기기에 손상이 발생할 수 있다. 전기적인 단락, 접지사고시는 높은 과도토크 및 과도전류를 발생하여 발전기에 여러 가지의 손상을 입힐 수 있으며 이러한 전기적인 사고시의 과도현상¹¹⁾은 잘 알려져 있다. 그러나 발전기 병렬운전시의 동기화실패로 인하여 발생하는 과도현상은 잘 알려져 있지 않고 이에 대한 연구도 찾아보기 힘들다.

보통 정상상태 운전의 경우 발전기에 발생하는 토크는 맥동하지 않는 단일 방향의 힘으로 작용한다. 그러나 발전기에 전기적인 단락 및 접지사고가 발생하면 크게 맥동하는 과도토크가 발생하여 기기에 큰 손상을 입히게 된다. 이와 비슷하게 발전기의 동기화실패로 인한 과도토크도 맥동하는 토크가 되며 일반적으로 알려진 전기적인 단락 및 접지사고시와 유사한 손상을 발전기에 입힐 수 있다.

영국선급¹²⁾에 보고된 동기화실패에 의한 발전기 손상의 유형은 고정자권선의 변형, 고정자철심과 프레임 사이의 거리변화, 브러시리스타입의 회전정류자의 손상, 축의 비틀림, 프레임 파손, 축단키의 손상과 축단면에서의 크랙확대, 커플링 파손, 기어의 손상 등이 있다. 그리고 최근 국적선사에서 발전기 병렬운전시의 반복되는 동기화실패로 인하여 발전기축이 절손되었다고 주장하는 사례¹³⁾가 보고되었다.

본 연구에서는 교류발전기 병렬운전시의 등가 모델을 제안하고 병렬투입시의 다양한 과도현상

을 면밀히 추적해 볼 수 있는 프로그램을 개발한다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 토대로 병렬운전시 정확한 동기투입의 필요성을 고찰하며 발전기 설계시 동기실패로 인한 과도토크의 영향도 고려되어야함을 살펴본다.

2. 교류발전기 과도현상 해석

2.1 임의의 회전좌표축에 대한 전압 및 토크 방정식

교류발전기의 전압방정식은 등가모델을 사용하여 다음과 같은 임의의 회전좌표축으로 표현할 수 있다.

$$u_{qd0s} = -r_s i_{qd0s} + \omega \lambda_{dqs} + p \lambda_{qd0s} \quad (1a)$$

$$v'_{qdr} = r' r i'_{qdr} + p \lambda'_{qdr} \quad (1b)$$

여기서

$$(f_{qd0s})^T = [f_{qs} \ f_{ds} \ f_{0s}] \quad (2a)$$

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \ -\lambda_{qs} \ 0] \quad (2b)$$

$$(f'_{qdr})^T = [f'_{kq1} \ f'_{kq2} \ f'_{fd} \ f'_{kd}] \quad (2c)$$

단, 위식에서 f 는 전기적인 물리량을 나타내고 첨자 “s”와 “r”은 각각 고정자와 회전자에 관계된 변수들이다. f_{qd0s} 는 고정자의 전압, 전류 및 쇄교자속이다. 또한, f'_{qdr} 은 회전자의 전압, 전류 및 쇄교자속이며 “'”는 고정자측으로 환산되었음을 의미한다. 첨자 “kq1”, “kq2”는 고정자권선에 나란한 방향의 제동권선, “kd”는 계자권선과 같은 방향의 제동권선을 나타내며 “fd”는 계자권선을 나타낸다. 그리고 ω 는 좌표축의 각속도이다.

인덕턴스가 일정하고 $\theta - \theta_s = \theta_{df}$ (θ :좌표축 각변위, θ_s :회전자의 각변위)라 가정하면 쇄교자속 방정식은 고정자 변수들을 임의의 축 변수들로 변환하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda'_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s (K_s)^{-1} & K_s L'_{sr} \\ (2/3) (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} & L'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{qd0s} \\ i'_{qdr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서

$$K_s L_s (K_s)^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2}(L_A - L_B \cos 2\theta_{df}) & -\frac{3}{2}L_B \sin 2\theta_{df} & 0 \\ -\frac{3}{2}L_B \sin 2\theta_{df} & L_{ls} + \frac{3}{2}(L_A + L_B \cos 2\theta_{df}) & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K_s L'_{sr} =$$

$$\begin{bmatrix} L_{mq} \cos \theta_{df} & L_{mq} \cos \theta_{df} & -L_{md} \sin \theta_{df} & -L_{md} \sin \theta_{df} \\ L_{mq} \sin \theta_{df} & L_{mq} \sin \theta_{df} & L_{md} \cos \theta_{df} & L_{md} \cos \theta_{df} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\frac{2}{3} (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} L_{mq} \cos \theta_{df} & L_{mq} \sin \theta_{df} & 0 \\ L_{mq} \cos \theta_{df} & L_{mq} \sin \theta_{df} & 0 \\ -L_{md} \sin \theta_{df} & L_{md} \cos \theta_{df} & 0 \\ -L_{md} \sin \theta_{df} & L_{md} \cos \theta_{df} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$L'_r =$$

$$\begin{bmatrix} L'_{lkq1} + L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & L'_{lkq2} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lfd} + L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & L_{md} & L'_{lkd} + L_{md} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$L_A = \frac{1}{3} (L_{mq} + L_{md}),$$

$$L_B = \frac{1}{3} (L_{mq} - L_{md}), \quad (8)$$

단, L_{md} 는 직축인덕턴스, L_{mq} 는 횡축인덕턴스이며 첨자 "l"은 각각의 누설인덕턴스를 나타낸다.

위의 식들에서 L'_r 행렬을 제외한 나머지 행렬의 항들은 θ_{df} 를 포함하기 때문에 미분방정식의 해를 구할 때 좌표축 회전속도의 영향을 받는다. 그러나 만약 임의의 축과 회전자 축의 속도를 일치시키면 계수행렬이 상수가 되어 식이 간단해지며 발전기의 과도상태를 해석하는데 아주 편리하게 된다. 또한, 발생하는 전기적 발생토크 T_e 를 표현하면 다음 식과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (9)$$

단, P 는 극수이다.

2.2 회전자 좌표축에 대한 전압 및 토크방정식

R. H. Park은 발전기 해석을 위해 고정자 변수를 회전자축상의 값들로 변환함으로써 시간에 따라 변하는 인덕턴스를 상수화 하였다. 발전기 전압 방정식을 Park's equation^[4]을 사용하여 표현하면 다음과 같다. 즉, 앞 절의 전압방정식에서 $\theta_{df}=0$ 인 경우이다.

$$v^r_{qd0s} = -r_s i^r_{qd0s} + \omega_r \lambda^r_{qds} + p \lambda^r_{qd0s} \quad (10a)$$

$$v^r_{qdr} = r^r_{iq} i^r_{qdr} + p \lambda^r_{qdr} \quad (10b)$$

여기서, 뒀첨자 "r"은 회전자 좌표축에 관한 변수를 나타낸다.

또한, 쇄교자속은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda^r_{qd0s} \\ \lambda^r_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K^r_s L_s (K^r_s)^{-1} & K^r_s L'_{sr} \\ 2/3 (L'_{sr})^T (K^r_s)^{-1} & L'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i^r_{qd0s} \\ i^r_{qdr} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서

$$K^r_s L_s (K^r_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{md} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$K^r_s L'_{sr} = \begin{bmatrix} L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\frac{2}{3} (L'_{sr})^T (K^r_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$L'_r =$$

$$\begin{bmatrix} L'_{lkq1} + L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & L'_{lkq2} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lfd} + L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & L_{md} & L'_{lkd} + L_{md} \end{bmatrix} \quad (15)$$

발생토크는 식(16)이 되고 발생토크에 의한 속도변화는 식(17)이 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda^r_{ds} i^r_{qs} - \lambda^r_{qs} i^r_{ds}) \quad (16)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \frac{P}{2} (T_i - T_e) \quad (17)$$

여기서 ω 은 회전자의 각속도, T_i 는 기계적 입력 토크를 나타낸다.

2.3 부하의 회전자 좌표축에 대한 전압방정식

전력시스템의 부하는 저항성분과 인덕턴스성분의 합으로 등가화할 수 있으며 이 경우의 전압방정식은 아래 식과 같다.

$$v_{abc} = r_L i_{abc} + p \lambda_{abc} \quad (18)$$

여기서

$$(f_{abc})^T = [f_{a} \ f_{b} \ f_{c}] \quad (19)$$

$$r_L = \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\lambda_{abc} = \begin{bmatrix} L_l & 0 & 0 & i_{al} \\ 0 & L_l & 0 & i_{bl} \\ 0 & 0 & L_l & i_{cl} \end{bmatrix} \quad (21)$$

단, f_{abc} 은 부하의 a, b, c 상에 대한 전압, 전류 및 쇄교자속을 나타내며 r_l 은 부하의 상당 등가저항, L_l 은 부하의 상당 인덕턴스를 나타낸다.

식(18)을 Park's equation을 사용하여 회전자 축에 대한 값으로 변환하면 식(22)를 얻을 수 있다.

$$v^{r_{ql}} = r_l i^{r_{ql}} + \omega_r L_l i^{r_{dl}} + L_l \frac{di^{r_{ql}}}{dt} \quad (22a)$$

$$v^{r_{dl}} = r_l i^{r_{dl}} - \omega_r L_l i^{r_{ql}} + L_l \frac{di^{r_{dl}}}{dt} \quad (22b)$$

$$v^{r_{ol}} = r_l i^{r_{ol}} + L_l \frac{di^{r_{ol}}}{dt} \quad (22c)$$

단, $f^{r_{ql}}, f^{r_{dl}}, f^{r_{ol}}$ 은 각각 부하의 d-q 축 전압 및 전류를 나타낸다.

3. 교류발전기 병렬운전시의 수학적 모델

A.C.B가 투입되어 전력시스템의 부하에 전력을 공급하고 있는 발전기를 마스터(Master), 새로이

병렬운전하고자 하는 발전기를 슬레이브(Slave)라고 정의한다. 운전중인 두 대의 발전기 회전자축 각변위의 오차가 θ_{df} 라고 가정하면 Fig. 1과 같은 마스터, 슬레이브의 모델을 얻을 수 있다. 즉, θ_{df} 는 두 발전기 유기전압의 위상각차이와 마스터 부하각의 합이 된다.

마스터 회전자의 위치를 기준으로 하여 두 발전기의 전압방정식을 세우면, 마스터의 경우 앞 절에서 Park's equation을 이용하여 세운 전압방정식인 식(10)과 같이 되고, 슬레이브는 마스터와 θ_{df} 의 각변위 차이가 있으므로 임의의 회전좌표축에 대한 방정식인 식(1)에서, $\theta = \theta_{r1}, \theta_r = \theta_{r2}$ 인 경우가 된다. 또한, 마스터의 회전자축에 대한 부하단의 전압방정식은 식(22)와 같이 표현할 수 있다.

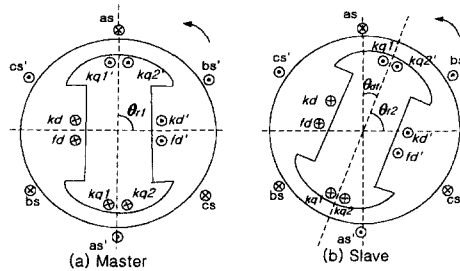


Fig. 1 Model of Master & Slave A.C. Generators

그리고 발전기 두 대를 사용하여 전력을 공급하는 시스템을 가정하면 전력시스템은 다음 그림과 같이 표현될 수 있다.

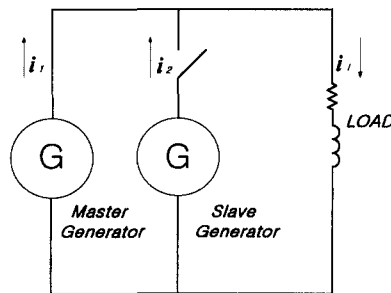


Fig. 2 Model of Power System

그림에서는 마스터가 단독으로 시스템에 전력을 공급하고 있으며 부하단의 전압은 마스터의 전압과 같다. 이때 시스템의 전력부족으로 슬레이브

$$\begin{aligned}
 Z_{2,8} &= -\frac{3}{2}LB_2\sin 2\theta_{df}, \\
 Z_{2,9} &= L_{is2} + \frac{3}{2}(LA_2 + LB_2\cos 2\theta_{df}) \\
 Z_{2,11} &= -L_{mq2}\sin\theta_{df}, Z_{2,12} = -L_{mq2}\sin\theta_{df}, \\
 Z_{2,13} &= -L_{md2}\cos\theta_{df} \\
 Z_{3,3} &= -L_{ls1}, Z_{3,10} = L_{ls2}, Z_{4,1} = L_{ls1} + L_{mq1}, Z_{4,4} = L_{mq1} \\
 Z_{4,5} &= -L_{mq1}, Z_{4,15} = -L_l, Z_{5,2} = -L_{ls1} - L_{md1}, Z_{5,6} = L_{md1} \\
 Z_{5,7} &= -L_{md1}, Z_{5,16} = -L_l, Z_{6,3} = L_{ls1}, Z_{6,17} = -L_l \\
 Z_{7,1} &= 1, Z_{7,8} = 1, Z_{7,15} = -1, Z_{8,2} = 1, Z_{8,9} = 1, Z_{8,16} = -1 \\
 Z_{9,3} &= 1, Z_{9,10} = 1, Z_{9,16} = -1 \\
 Z_{10,1} &= -L_{mq1}, Z_{10,4} = L_{lkq11} + L_{mq1}, Z_{10,5} = L_{mq1} \\
 Z_{11,1} &= -L_{mq1}, Z_{11,4} = L_{lmq1}, Z_{11,5} = L_{lkq21} + L_{mq1} \\
 Z_{12,2} &= -L_{md1}, Z_{12,6} = L_{lfd1} + L_{md1}, Z_{12,7} = L_{md1} \\
 Z_{13,2} &= -L_{md1}, Z_{13,6} = L_{lmd1}, Z_{13,7} = L_{lkd1} + L_{md1} \\
 Z_{14,8} &= -L_{mq2}\cos\theta_{df}, Z_{14,9} = -L_{md2}\sin\theta_{df} \\
 Z_{14,11} &= L_{lkq12} + L_{mq2}, Z_{14,12} = L_{mq2}, Z_{15,8} = -L_{mq2}\cos\theta_{df} \\
 Z_{15,9} &= -L_{md2}\sin\theta_{df}, Z_{15,11} = L_{mq1}, Z_{15,12} = L_{lkq22} + L_{mq2} \\
 Z_{16,8} &= L_{md2}\sin\theta_{df}, Z_{16,9} = -L_{md2}\cos\theta_{df} \\
 Z_{16,13} &= L_{lfd2} + L_{md2}, Z_{16,14} = L_{md2} \\
 Z_{17,8} &= L_{md2}\sin\theta_{df}, Z_{17,9} = -L_{md2}\cos\theta_{df} \\
 Z_{17,13} &= L_{md2}, Z_{17,14} = L_{lkd2} + L_{md2}
 \end{aligned}$$

위의 미분방정식 계수행렬 R, L 및 Z 의 각 원소 중 명시하지 않은 모든 원소들의 값은 0이며, 첨자 "1"은 마스터, "2"는 슬레이브에 관계된 변수이다.

4. 과도현상 시뮬레이션 및 검토

교류발전기의 과도상태를 해석하기 위해서 육상발전소용 대형 증기터빈발전기와 선박에서 사용하는 소형 디젤발전기에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션에 사용된 증기터빈발전기의 용량은 835[MVA]이며 선박용 소형 디젤발전기의 용량은 600[KVA]인 한국해양대학교 실습선 한나라호 발전기를 사용하였다. 증기터빈발전기의 파라미터는 서적[1]을 참고하였고 실습선 한나라호 발전기의 파라미터는 제작업체인 (주)현대중전기로부터 입수하였다. 발전기의 각 파라미터는 Table 1과 같으며 시뮬레이션에서 얻은 데이터는 pu 단위를 사용하여 도시하였다.

4.1 정격 운전중인 1대의 발전기에 병렬투입의 경우

두 대의 발전기를 사용하는 육상, 선박용 전력시스템에서 전부하로 운전중인 마스터에 슬레이브를 병렬투입시 두 발전기 사이의 전압 위상각의 차이 정도에 따라 발생하는 과도현상을 시뮬레이션하였다.

Fig. 3은 대형발전기 60° 위상차 병렬시의 전류 및 토크를 나타내며 발생전류는 4.6(pu), 발생토크는 마스터가 4.8(pu) 슬레이브는 3.5(pu)가 발생된다. Fig. 4는 소형의 경우로 전류는 3.5(pu)가 발생하며 토크는 마스터의 경우 4.5(pu), 슬레이브의 경우 2.7(pu)가 발생한다.

Fig. 5는 대형발전기 120° 위상차 병렬시의 전류와 토크를 나타내며 전류는 7.2(pu)가 발생되고 토크는 마스터가 6(pu), 슬레이브는 5.5(pu)가 발생한다. Fig. 6은 소형의 경우이며 전류는 6.4(pu)가 발생하고 토크는 마스터가 6(pu), 슬레이브는 4.6(pu) 정도가 발생된다. 그림에서 알 수 있듯이 120° 위상차 병렬시 전류 및 발생 토크가 가장 크다.

시뮬레이션 결과 두 대의 발전기를 사용하는 전력시스템에서 발전기 병렬시 발생하는 토크는 슬레이브보다 마스터가 더 크게 발생한다.

4.2 정격 운전중인 2대 이상의 발전기에 병렬투입의 경우

여러 대의 발전기를 사용하는 전력시스템에서의 발전기 병렬운전 시뮬레이션을 행하였다. 육상용 전력시스템에서는 다수의 발전기가 병렬운전되어 사용되므로 대형발전기(마스터) 10대가 병렬로 정격운전 중 한 대의 슬레이브가 전력시스템으로 투입되는 상태를 시뮬레이션 했으며 선박용 전력시스템에서는 보통 2~3대의 발전기를 병렬운전하여 사용하므로 소형발전기(마스터) 2대가 병렬로 정격운전 중 한 대의 슬레이브가 시스템에 투입되는 상태를 시뮬레이션하였다.

여러 대의 발전기를 병렬운전하여 사용하는 전력시스템의 등가저항 및 리액턴스는 한 대의 발전기를 사용하는 전력시스템보다 작아지게 된다. 만

Table 1 Parameters of generators

구 분	대형 발전기 (육상용)	소형발전기 (선박용)
정격 용량	835[MVA]	600[KVA]
선간 전압	26[KV]	450[V]
역률	0.85	0.8
극수 (P)	2	10
속도 [r/min]	3600	720
고정자권선 저항	0.00243	0.00576
고정자권선 누설 리액턴스	0.1538	0.03087
회축 리액턴스	1.457	0.7252
직축 리액턴스	1.457	0.8658
* 회축 1차 제동권선 저항	0.00144	0.04181
* 회축 2차 제동권선 저항	0.00681	-
* 회축 1차 제동권선 누설 리액턴스	0.6578	0.05673
* 회축 2차 제동권선 누설 리액턴스	0.07602	-
* 계자 권선 저항	0.00075	0.002621
* 계자 권선 누설 리액턴스	0.1145	0.05906
* 직축 제동권선 저항	0.0108	-
* 직축 제동권선 누설 리액턴스	0.06577	-
관성 모멘트	65800	371

*표는 고정자측으로 변환한 값

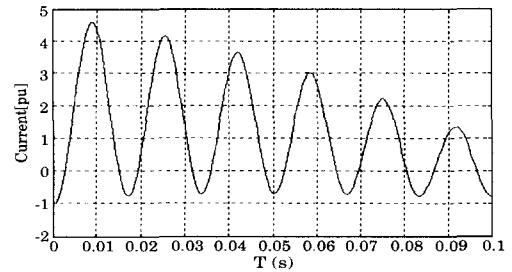
약 동일한 발전기 n 대를 병렬운전하여 사용한다면 이 시스템의 등가저항 및 리액턴스는 한 대의 발전기를 사용하는 시스템에 비하여 $1/n$ 배로 작아지게 된다.

Fig. 7은 대형발전기 60° 위상차 병렬시의 전류와 토크를 나타내고 있다. 슬레이브의 발생전류는 $6.6(\text{pu})$ 이고 발생토크는 마스터가 $1.5(\text{pu})$, 슬레이브는 $6.2(\text{pu})$ 로 슬레이브에 높은 토크가 발생한다. Fig. 8은 소형발전기의 경우로 전류는 슬레이브의 경우 $3.8(\text{pu})$ 이고 토크는 마스터가 $3.1(\text{pu})$, 슬레이브는 $3.6(\text{pu})$ 로 슬레이브에 발생하는 토크가 더 크다. 전력시스템에 병렬운전되는 발전기가 많으

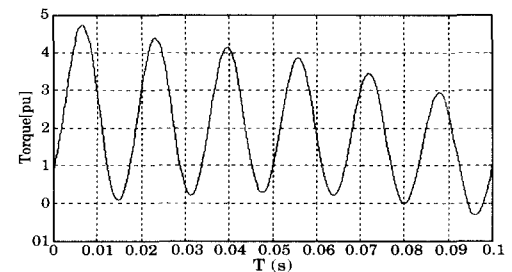
면 많을수록 슬레이브에 발생하는 전류 및 토크는 커진다.

Fig. 9는 대형발전기 120° 위상차 병렬시의 전류와 토크를 나타내며 슬레이브의 발생전류는 $12(\text{pu})$ 이고 발생토크는 마스터가 $1.7(\text{pu})$, 슬레이브가 $11.6(\text{pu})$ 정도 발생한다. 이 값은 선간단락시의 과도토크 $6.0(\text{pu})$, 과도전류 $7.5(\text{pu})$ 에 비교하여 훨씬 큰 값은 보여준다. Fig. 10은 소형발전기의 경우로 슬레이브의 발생전류는 $8(\text{pu})$ 가 발생하며 토크는 마스터가 $3.9(\text{pu})$, 슬레이브는 $5.9(\text{pu})$ 가 발생한다. 대형발전기는 정격운전중인 1대의 발전기에 병렬투입시보다 훨씬 큰 전류와 토크가 발생하는데 이는 1대의 발전기를 사용하는 전력시스템보다 등가저항 및 리액턴스가 $1/10$ 로 줄어들기 때문이다.

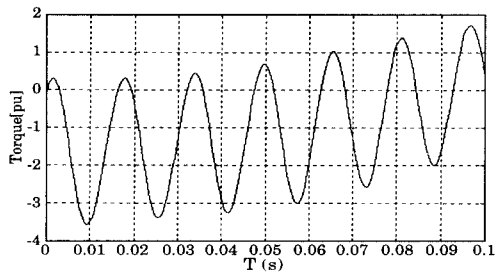
시뮬레이션 결과 두 대의 동기발전기를 사용하는 시스템과 달리 투입되는 슬레이브에 더 큰 전류와 토크가 발생하며 그 크기는 병렬운전되고 있는 발전기가 많으면 많을수록 커진다.



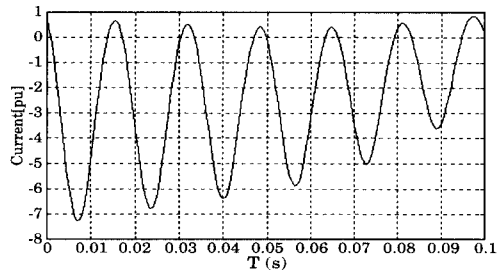
(a) Phase Current



(b) Master Generator Torque

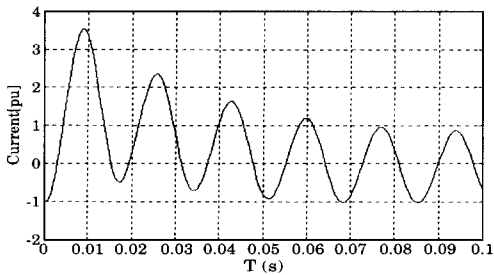


(c) Slave Generator Torque

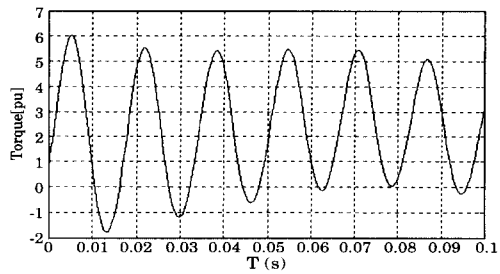


(a) Phase Current

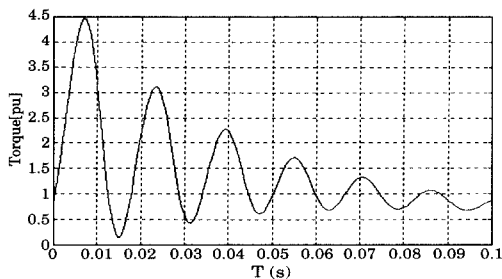
Fig. 3 Current and Torque Paralleling on 60° phase difference for Power Station Generators (Master : Slave = 1 : 1)



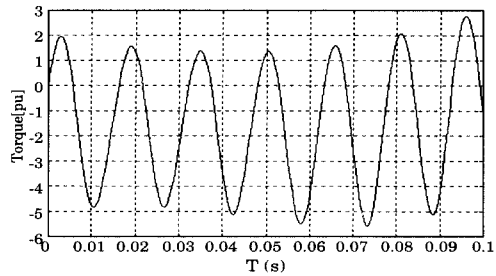
(a) Phase Current



(b) Master Generator Torque

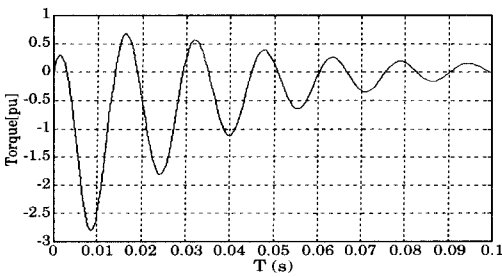


(b) Master Generator Torque

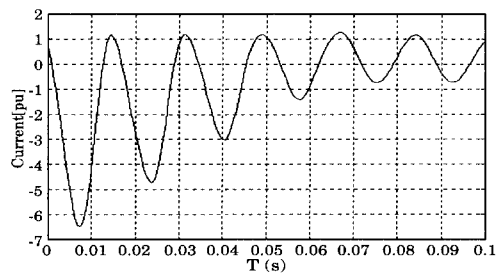


(c) Slave Generator Torque

Fig. 5 Current and Torque Paralleling on 120° phase difference for Power Station Generators (Master : Slave = 1 : 1)

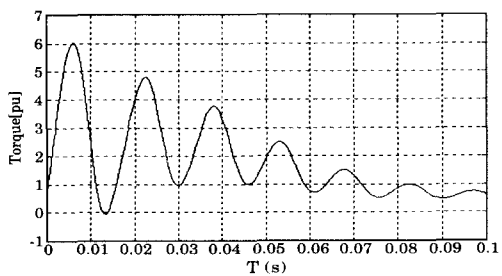


(c) Slave Generator Torque

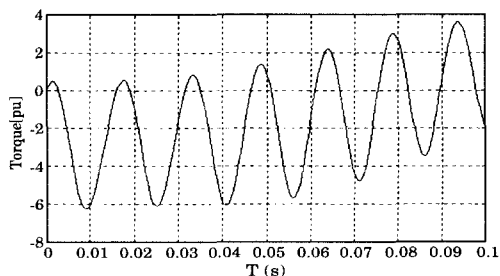


(a) Phase Current

Fig. 4 Current and Torque Paralleling on 60° phase difference for Marine Generators (Master : Slave = 1 : 1)

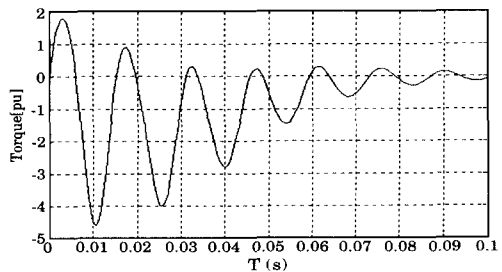


(b) Master Generator Torque



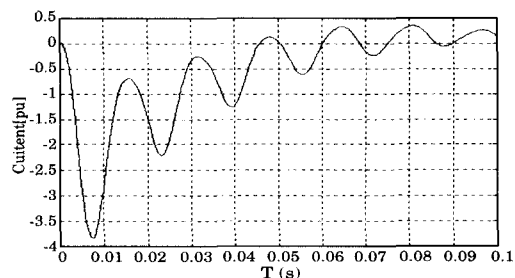
(c) Slave Generator Torque

Fig. 7 Current and Torque Paralleling on 60° phase difference for Power Station Generators (Master : Slave = 10 : 1)

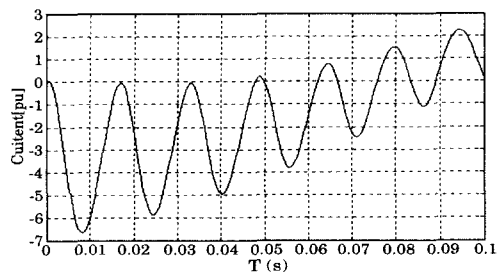


(c) Slave Generator Torque

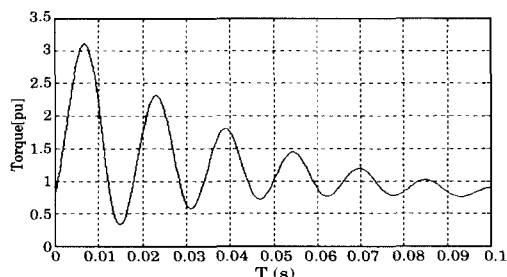
Fig. 6 Current and Torque Paralleling on 120° phase difference for Marine Generators (Master : Slave = 1 : 1)



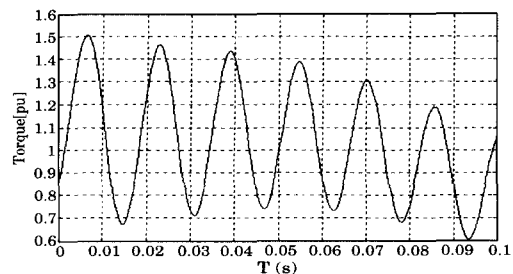
(a) Phase Current



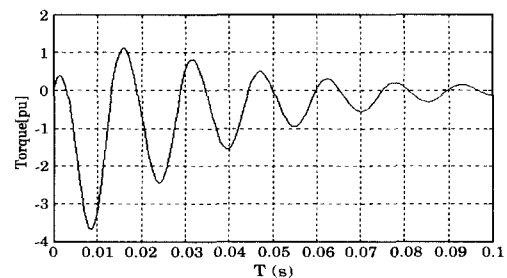
(a) Phase Current



(b) Master Generator Torque

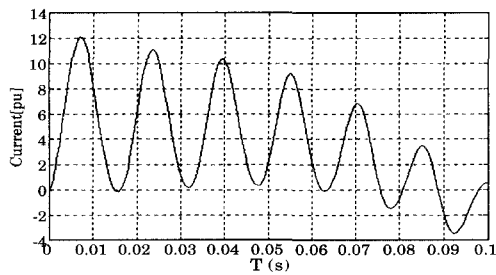


(b) Master Generator Torque

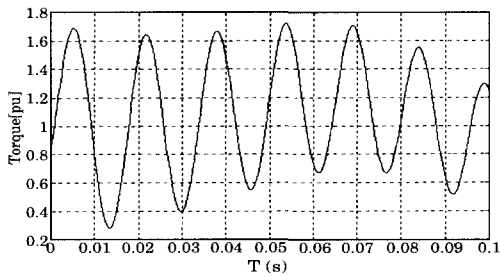


(c) Slave Generator Torque

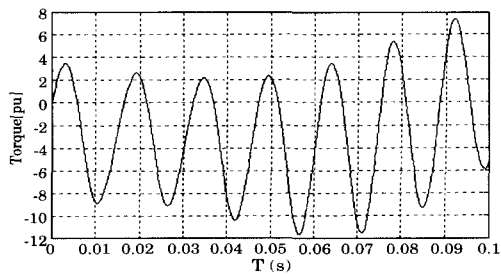
Fig. 8 Current and Torque Paralleling on 60° phase difference for Marine Generators (Master : Slave = 2 : 1)



(a) Phase Current

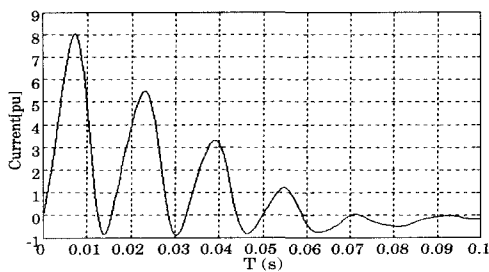


(b) Master Generator Torque

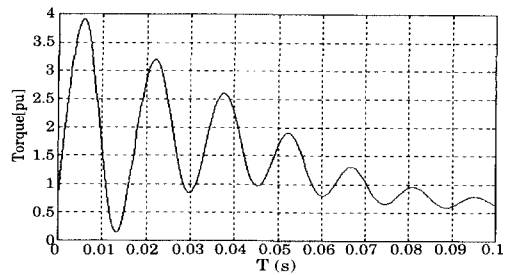


(c) Slave Generator Torque

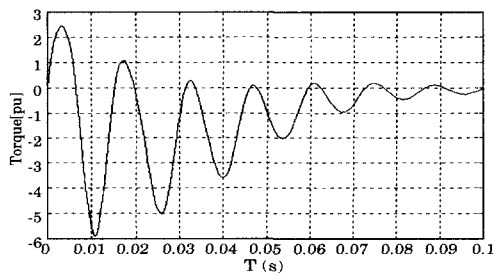
Fig. 9 Current and Torque Paralleling on 120° phase difference for Power Station Generators (Master : Slave = 10 : 1)



(a) Phase Current



(b) Master Generator Torque



(c) Slave Generator Torque

Fig. 10 Current and Torque Paralleling on 120° phase difference for Marine Generators (Master : Slave = 2 : 1)

5. 결 론

본 논문에서는 교류발전기 병렬운전시의 수학적 모델을 제시하고 모델로부터 병렬운전시의 전압방정식을 유도하였다. 또한, 이 전압방정식을 이용하여 발전기 병렬운전시 전압의 위상각 차이에 기인하는 과도현상을 알아볼 수 있는 프로그램을 개발하였다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 교류발전기 병렬운전시에 발생하는 과도토크 및 과도전류는 병렬운전시의 전압의 위상각 차이 및 마스터의 부하 정도에 따라 다르게 발생하나 전압의 위상각 차이가 120°일 때 최대의 과도전류와 과도토크가 발생하며 그 크기는 발전기 병렬운전시의 상태에 따라서 전기적인 단락, 접지시의 과도상태보다 더 큰

전류와 토크를 발생시킬 수 있다.

- 2) 전력시스템에 2대의 발전기를 사용하는 경우의 병렬에서는 마스터에 더 큰 전류와 토크가 발생하나 전력시스템에 여러 대의 발전기가 병렬로 운전중인 경우의 병렬에서는 시스템에 투입되는 슬레이브에 더 큰 전류와 토크가 발생된다.
- 3) 육상발전소와 비교할 때 선박에서는 발전기 병렬운전시에 용량이 큰 모터의 갑작스런 기동 등으로 전압 위상각의 차이가 날 수 있고 또한 운전자의 잘못된 동기투입으로 전압의 위상각 차이가 난 채 병렬운전이 될 수 있으므로 순간적으로 과도한 토크를 발생시킬 수 있다. 전기적인 단락사고는 흔하게 일어나지 않지만 부적절한 동기화는 빈번히 이루어지고 있는 실정이므로 발전기 설계시 동기화실패에 기인하는 과도토크를 감안하여 설계하는 것이 필요하다고 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, 1987
- [2] de Jong, W. and Robinson. J.K, "Generator Failures caused by Synchronising Torque", Transactions of Institute of Marine Engineers, Vol. 99. Paper 8. 1986
- [3] 현대중공업 전동기설계부, "고려해운/SAS-375호선 No.2 발전기 SHAFT 절손사고 보고서", 현대중공업 전동기설계부, 1999
- [4] R. H. Park, "Two - Reaction Theory of Synchronous Machines - Generalized Method of Analysis - part 1", AIEE Trans., Vol. 48, July 1929, pp. 716-727.
- [5] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999
- [6] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", Prentice Hall, 1998
- [7] Peter F. Ryff, "ELECTRIC MACHINERY", Prentice Hall, 1994

- [8] Vincent Del Toro, "Electric Power Systems", Prentice Hall, 1992
- [9] Bhag S. Guru Huseyin R. Hisiroulu, "Electric Machinery and Transformers", Harcourt Brace & Company, 1995
- [10] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, "ELECTRIC MACHINERY", McGraw-Hill, 1991
- [11] George Mcpherson, Robert D. Laramore, "AN INTRODUCTION TO ELECTRICAL MACHINES AND TRANSFORMERS", John Wiley & Sons, 1981
- [12] Paresh C. Sen저 장도현, 차귀수, 신대철, 홍선기 공역, "Principles of Electric Machines and Power Electronics", John Wiley & Sons, 1997

저 자 소 개



오세진(吳世眞)

1972년 5월생. 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 2001년 동대학원 졸업(석사). 현재 동대학원 기관공학과 박사과정



김현수(金炫秀)

1970년 11월생. 1993년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1999년 목포해양대학교 대학원 졸업(석사). 1999년~현재 한국해양대학교 대학원 기관공학과 박사과정



김성환(金成煥)

1954년 11월생. 1979년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1990년 부경대학교 대학원 졸업(석사). 1998년 부산대학교 대학원 졸업(박사). 현재 한국해양대학교 선박전자기계공학부 부교수