

HVDC단에 연결된 터빈-발전기의 비틀림 스트레스 해석

論 文

50B-8-7

Torsional Stress Analysis of Turbine-Generator Connected to HVDC System

金 燦 起*
(Chan-Ki Kim)

Abstract - This paper deals with the impact of an inverter station on the torsional dynamics of turbine-generator which is located at the inverter side of a HVDC-AC network power system. The studies show that the torsional stress of turbine-generator depends on the AC network fault locations because of the commutation failures of inverter station. And the torsional stress induce fatigue in the shaft material and reduce the shaft life-time. So, the purpose of this paper is to analysis the torsional stress of turbine-generator shaft at inverter side, to find the checked points of turbine-generator. The EMTDC program is used for the simulation studies.

Key Words : HVDC, Turbine-Generator, Torsional Torque, Fatigue, EMTDC

1. 서 론

계통의 용량이 늘어나고 국가간이나 지역간에 전력 계통을 연계하려는 노력은 이제 보편화된 기술로써 세계 각 지역에 폭넓게 적용되고 있으며 HVDC시스템을 이용한 전력 전송 개념은 지금까지의 학문 영역을 넘어서는 새로운 연구 분야로 자리 잡고 있다. 지난 20년간 AC계통에서 AC계통의 사고, 계통의 분리 그리고 계통의 재투입에 따른 발전기의 충격을 연구한 논문은 많이 나왔으며 어느 정도 완성된 형태의 기술로써 자리잡고 있다. 그러나 HVDC시스템을 포함하는 계통의 발전기 충격은 많은 연구가 없었으며, 지금까지 외란에 대한 발전기의 충격과 HVDC시스템과 연계된 AC 계통에서 외란을 다룬 논문을 분석해 보면 다음과 같다.

첫 번째로 S.O. Faried는 1997년 IEEE에 발표한 논문에서 비정상적으로 HVDC컨버터가 동작하는 경우, 즉, Fire-through나 Misfire가 터빈-발전기 축의 비틀림 토크에 어떻게 영향을 미치는가를 분석하면서 HVDC시스템의 스위칭 동작에 의한 비틀림 토크는 터빈-발전기에 영향을 미치지 않고, 비틀림 토크의 영향은 고장 지속시간과 접호 각의 함수라는 사실을 발표하였다[1].

두 번째로, M. R. Iravani는 1993년 IEEE에 발표한 논문에서 정류기의 전류제어기와 인버터의 소호각 제어기는 Sub-synchronous 주파수에서 AC시스템과 상호 작용을 할 수 있다는 것을 보여 주고 터빈-발전기 시스템의 불안정성

을 초래할 수 있다는 것을 보여 주고 있으며,

저주파 비틀림 충격은 1) 인버터 AC계통의 강도, 2) 터빈-발전기와 인버터 축의 AC모선 사이의 전기적인 강도(병렬 회선 또는 HVDC-AC)에 영향을 받는다는 사실을 보여 주었다[2][3].

세 번째로, C. Chyn은 1996년 IEE에 발표한 논문에서 순수한 AC 계통(HVDC 시스템이 없는)에서는 Line-to-Line 고장과 3상고장이 최악의 고장이기 때문에, 터빈-발전기를 설계할 때 터빈-발전기의 강도는 최악의 조건을 고려해야 한다고 주장하였다[4].

네 번째로, W. Shi는 1994년 IEE에 발표한 논문에서 HVDC Line고장에 연결된 터빈-발전기의 스트레스를 연구하면서 HVDC 시스템이 연결된 AC 축에서 고장이 발생한 경우에 터빈-발전기 비틀림 토크에 의한 스트레스는 HVAC 고장의 경우 보다 덜 심각하며, 고장의 위치 또한 덜 민감하다고 주장하였다[5].

그리고 1980년에 Ramey가 IEEE에 발표한 논문에서는 AC 계통의 고장 원인 의해 발생된 터빈 축의 고주파 비틀림 토크에 의해 LP터빈의 가장 끝에 위치해 있는 날개(Blade)는 단상 지락사고 시에 날개의 수명이 저하되는 피로가 누적된다고 보고하였으며[6], 1994년에 Hammons는 IEEE에 발표한 논문에서 HVDC시스템의 고조파에 의해서 터빈-발전기에 충격이 가해 질 수 있다는 사실을 주장하였다. 그리고 Hammons는 고조파의 영향이 터빈-발전기에 충격을 유발하지만 터빈-발전기를 설계할 때 안전율을 고려하여 설계하면 큰 무리가 없음을 주장하였다[7].

* 正 會 員 : 電力研究員 前任研究員
接受日字 : 2001年 5月 26日
最終完了 : 2001年 7月 3日

위에서 발표한 논문은 대부분 정밀 시뮬레이션 기법을 이

용하여 분석하였기 때문에 근거와 타당성이 충분하나, 모든 경우에서 타당한 것은 아니다. 이러한 이유는 AC 계통과 달리 HVDC시스템은 렉티파이어 단과 인버터 단이 유사한 제어 동작을 함에도 불구하고 특성의 차이를 가지고 있기 때문에 위에서 논한 여러 가지 주장이 모순을 가질 수 있다.

우선적으로, 위에서 발표한 HVDC시스템이 있는 AC계통에서 터빈-발전기의 영향을 분석한 논문은 모두가 렉티파이어가 전류제어를 행하면서 정류기 단에서 고장이 발생한 경우에 정류기 측의 터빈-발전기의 스트레스와 피로현상을 고려하였으며 HVDC시스템이 AC계통의 보조 선로로서 검토되었다.

만약 HVDC인버터 단이 전류 제어를 행하고, HVDC인버터 단의 AC계통에 고장이 발생한 경우에 HVDC인버터 단에 연결되어 있는 터빈-발전기의 충격을 고려하는 경우에는 위에서 주장하는 결과와 다른 결론이 도출될 수 있는데 그 이유는 다음과 같다.

첫 번째로, HVDC인버터 단에서는, 렉티파이어 단에서는 거의 고려하지 않아도 되는 정류실패(Commutation Failure)가 일어나고, HVDC의 정류 실패에 따른 발전기의 충격은 정류기 단의 발전기와 다른 결과가 도출된다. 즉, 정류기 단에서는 근거리 고장만이 의미가 있고, 원거리 고장은 많이 의미가 없지만(이것은 AC 계통에서도 마찬가지 결론이 도출될 수 있다.), 인버터 단에서는 근거리 고장과 원거리 고장이 다 의미가 있다. 인버터 단에서 근거리 고장이 일어나면 모든 밸브가 정류 실패를 일으키고 인버터 측 밸브에는 썬치 형태의 DC 과전류가 유입이 되는데 반해, 원거리 고장은 인버터가 Y-△변압기 측에서 모두 발생하는 것인지 아니면 Y변압기 측 밸브에서 만 일어나는지 구분되어 질 필요가 있다(동일한 전압 강하에서 Y 결선 변압기 측 밸브는 △ 결선 변압기 측 밸브보다 정류실패를 일으킬 확률이 낮다).[8] 또한 3상 지락고장과 단상 지락고장 시에도 정류 실패를 일으키는 전압 레벨이 각각 다르고, 정류실패의 형태도 다르기 때문에 W.Shi가 주장하는 HVDC 시스템에서 고장의 위치는 덜 민감하다는 주장은 HVDC인버터 측에서는 타당하지가 않다. 그리고, HVDC 시스템은 정류 실패가 발생하면 정류실패를 줄이기 위해서, 순간적으로 소호각 마진을 늘리는 제어를 행하기 때문에 시스템의 상태가 바뀌고 이때문에 발전기에 가해지는 스트레스도 달라질 수 있다.

두 번째로, HVDC 정류기 측에서 AC고장이 발생하면 DC 전류가 줄어드는데 반해 인버터 단에서는 AC계통고장이 발생하면 정류기 측의 DC전류 보다 많은 선로의 충전 전류가 인버터 단에 유입이 되는데 이러한 DC 과전류는, 완전 정류 실패가 일어나는 경우에는 인버터 측 AC계통으로 전류가 유입되지 않으나, 부분 정류 실패가 일어나는 경우에는 불규칙하고 예측할 수 없는 과전류가 인버터 측 AC계통으로 흘러 들어간다. 그리고 인버터 측 AC계통으로 유입되는 전류는 변압기의 포화 특성에 의해 고조파가 다량 함유하고 있기 때문에 인버터 측 AC 측 터빈-발전기에는 정류기 측 터빈-발전기에서 나타나는 스트레스와 다른 형태의 저주기

(Low-frequency)스트레스와 레스가 터빈-발전기에 누적된 결과와 동일한 결과가 HVDC 기에서는 적용되지 않는다고

본 논문은 이상에서 논한 내용의 타당성을 증명하기 위하여 보조 AC전송 라인이 없으며, HVDC인버터 단이 전류제어를 행하며, 렉티파이어 단 보다 상대적으로 작은 계통인 한국의 제주-해남 HVDC 시스템을 이용하였으며, 터빈-발전기의 스트레스 또한 HVDC 인버터 단의 모선에 직접 연결된 실제의 발전기 모델을 이용하였다. 그리고 시뮬레이션 기법은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 해석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다.

제 1장 서론, 제 2장 피로 이론 및 모델, 제 3장 터빈-발전기 모델링, 제 4장 HVDC인버터 단에서 정류실패가 터빈-발전기에 미치는 영향, 제 5장 시뮬레이션 및 결과 검토 그리고 제 6장 결론으로 구성하였다.

2. 피로 이론 및 모델

NiCrMoV(니켈-크롬-몰리브덴-바나듐)은 저압 터빈의 로터에 사용하는 재료이고, CrMoV(크롬-몰리브덴-바나듐)은 고압 터빈의 로터에 사용하는 재료이다. 단조적이면서 일정한 스트레스가 계속적으로 유입되는 상황에서 스트레스 크기와 스트레인(변위) 크기사이의 상관 식은 다음과 같이 유도된다.

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left[\frac{\sigma_a}{H} \right]^s \quad (1)$$

여기서, ϵ_a 는 스트레인의 크기, σ_a 는 스트레스의 크기, E는 탄성(Elastic) 계수 그리고 H와 s는 상수이다.

유사하게, 비틀림 동작이 있는 재질에서 스트레스의 크기와 스트레인의 크기 사이의 상관 관계는 다음과 같다.

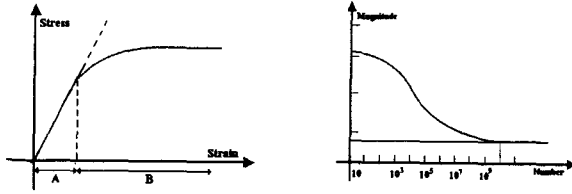
$$\gamma_{\infty} = \frac{\tau_{\infty}}{G} + \left[\frac{\tau_{\infty}}{H'} \right]^s \quad (2)$$

재질의 피로특성은 스트레인의 크기(ϵ_a)와 인가되는 스트레스의 횟수(N_f)의 함수로 표현되는데 식 (3)은 이들 사이의 상관 식을 보여 주고 있다.

$$\epsilon_a = A(2N_f)^\alpha + B(2N_f)^\beta \quad (3)$$

여기서, A, α , B, 그리고 β 는 스트레인의 탄성 성분(Elastic Component)와 가소성 성분(Plastic Component)에 의해 결정된다. 회전하고 있는 재질에 대한 스트레인의 크기(γ_a)와 인가되는 스트레스의 횟수(N_f)사이의 상관 식은 다음과 같다.

$$\gamma_a = A'(2N_f)^{\alpha'} + B'(2N_f)^{\beta'} \quad (4)$$



a) 스트레스와 Strain의 관계 b) 피로곡선

그림 1 스트레스와 피로곡선.
Fig. 1 Stress and Fatigue Curve.

그림 1에서 A는 Elastic Strain영역, B는 Plastic Strain영역, Elastic strain은 기기에 스트레스가 인가되어진 경우에 다시 처음의 상태로 복원력을 갖는 영역을 말하며, Plastic strain 영역은 기기에 스트레스가 인가된 경우에 기기의 변형을 일으키는 영역을 말한다. 고주기 피로는 수많은 작은 크기의 서지에 의해서 발생하고, Elastic Deformation의 원인이 되며, 저주기 피로는 발생 서지의 수는 작지만 비교적 큰 크기의 서지에 의해서 발생되고 Plastic Deformation의 원인이 된다. 그림 1에서 피로 곡선은 피로수명, 기기에 반복적인 교번 하중을 인가하여 기기가 파손될 때까지 피로 한도는 그림 1 b)의 사각형 이내에서는 재질이 영원히 파괴되지 않는다는 것을 알 수 있다. 이때 이것을 **피로 한도**라 한다.

Palmgren-Miner 법칙은 스트레스가 인가되면서 피로가 누적되면서 재질의 파손을 가져오는 법칙을 선형적으로 표현하였는데 이 법칙은 다음과 같다.

$$\sum \frac{n_i}{N_{fi}} = \text{Fraction of life lost} \quad (5)$$

여기서, n_i 는 i 번째 스트레스 레벨이 인가되는 횟수, N_{fi} 는 i 번째 스트레스 레벨이 고장을 일으키는 횟수

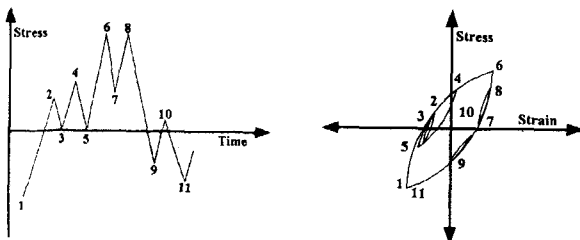


그림 2 스트레스와 변위의 예
Fig. 2 Sample of stress strain history

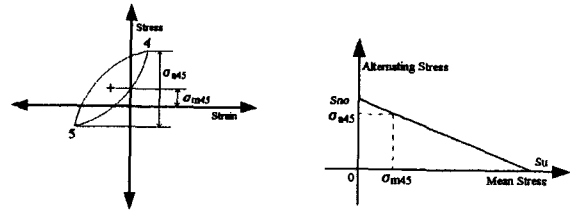


그림 3 스트레스-변위의 연관성과 Goodman 라인
Fig. 3 Stress- strain relation and Goodman-Line

실제로 여러 형태의 스트레스에 의해 발생하는 피로를 해석하기 위해서 "**평균 스트레스(Mean Stress)**" 개념이 도입되어야 하는데, 다양한 크기의 스트레스에 의해 피로가 누적되는 정도를 표시한 것이 그림 3에서 보여주는 Goodman라인이며 Goodman라인으로부터 우리는 평균 스트레스를 구할 수 있다. 이러한 피로곡선은 터빈을 만드는 재료에 따라 달라지며, 터빈-발전기 축의 피로 모델을 완성시키기 위해서 측정된 축 토크를 재질의 스트레스로 변환할 필요가 있다. 우선적으로 터빈-발전기 축의 변형을 탄성 영역만을 가정하고 반경 R_0 의 축에 대해서 전단 응력(Shear Stress)을 σ_s 은 식 (6)과 같이 토크 τ 에 따라 선형적으로 변한다.

$$\sigma_s = \frac{(\sigma_{\max})\tau}{R_0} \quad (6)$$

여기서, σ_{\max} 는 맨 바깥 쪽 반경에서 전단 응력

이 값을 토크의 형태로 변환하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\sigma_{\max} = \frac{2\tau}{\pi R_0^3} \quad (7)$$

3. 터빈의 구조 및 모델링

터빈은 증기의 열팽창 원리를 이용해서 터빈의 날개를 회전시키는 것으로서 일반적인 화력 발전기를 기본으로 생각하면 그림 4와 같이 구성된다.

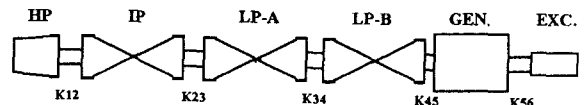


그림 4 터빈의 구조 (HP : High Pressure Turbine, IP : Intermediate Pressure Turbine, LP-A : Low Pressure Turbine - A, LP-B : Low Pressure Turbine - B)
Fig. 4 Turbine Structure.

그림 4에서 HP는 고압 터빈(High Pressure Turbine)축이라 명명되며, 계통의 부하 가감에 따라 증기량을 제어하는 터빈 제어기(Governor)가 부착되어 있다. HP터빈에 유입되는 수증기는 고압/고온의 기체로써 HP터빈을 통과한 후에

는 압력과 온도가 낮아진다. 따라서 LP터빈으로 수증기를 보내기 전에 HP터빈의 출력 수증기를 재 가열하는 부분이 IP터빈이며 IP터빈의 출력은 LP터빈에 주입된다. LP터빈은 저압 터빈(Low Pressure Turbine)축이라 명명되며, LP터빈의 목적은 터빈의 기계적인 열효율을 높이기 위해서 HP터빈에서 나오는 증기를 한번 더 이용하여 터빈을 회전시키는 역할을 한다. 터빈의 동작원리를 살펴보면 고압(고온의 증기)의 증기를 HP터빈에 입력시켜 터빈을 회전시키면 증기의 열 에너지가 속도에너지로 바뀌게 되고, HP터빈의 출구에서 저압(저온의 증기)의 증기가 나오면 이를 다시 한번 가열하여 LP터빈에 입력되어 터빈을 회전시킨다. 그리고 터빈이 계통의 조건에 따라 터빈의 회전수, 즉, 유효전력을 제어하려고 하는 경우에는 HP터빈의 입력 단에 위치한 밸브를 조정하여 증기 량을 조정함으로써 제어가 된다. 그리고 터빈의 구조가 원통과 원뿔형인 이유는 기동 및 정지 시에 발생하는 열 응력을 줄이기 위함이다. 고압 및 저압 터빈 로터는 터빈으로부터 유입되는 고온 증기 영향으로 표면에 큰 온도 변화가 발생한다. 만약 빈번한 기동, 정지 그리고 부하의 큰 변화는 큰 열 응력을 발생시키므로 로터를 열화시킨다. 한편, 터빈-발전기의 진동은 횡 진동과 비틀림 진동으로 나뉘어질 수 있는데 횡 진동(터빈이 위아래로 진동)에 대한 터빈-발전기의 모델링은 질량과 스프링 상수에 의해서 모델링이 되고, 비틀림 진동에 대한 터빈-발전기 모델링은 관성 모멘트와 스프링 상수에 의해서 모델링 된다. 터빈-발전기 시스템에서 비틀림 진동에 관한 스트레스를 확인하기 위해서 터빈-발전기의 관성과 스티프니스(변위)의 수식은 다음과 같다.

$$H = J \frac{1}{2} \frac{\omega_{o.m}^2}{VA_{base}} = J \frac{1}{2} \frac{[2\pi(r/min)/60]^2}{VA_{base}} \quad (8)$$

$$K = \frac{GF}{L}, \quad F = \frac{\pi d^4}{32} \quad (9)$$

$$T = K\theta \quad (10)$$

$$T_{base} = \frac{VA_{base}}{\omega_{o.m}} = VA_{base} \frac{pf}{2\omega_o} \quad (11)$$

$$K \text{ [pu torque/electrical rad]} = \frac{K \text{ N} \cdot \text{m/mechanical rad}}{(pf/2)T_{base}} \\ = \frac{K \text{ N} \cdot \text{m/mechanical rad}}{VA_{base}} \left[\frac{4\omega_o}{\pi^2} \right] \quad (12)$$

여기서, H는 관성상수, VA_{base}는 시스템을 P.U단위로 나타내기 위한 기준 값, ω_{o.m}는 정격 각속도, K는 비틀림 스티프니스(스프링 상수), G는 축 재료의 강성율, F는 기하학적 구조에 의한 계수, L은 축의 길이, d는 축의 반경 그리고 θ는 전기 각, pf는 기계 각이다.

한편, 터빈을 설계할 때 발전기단에서 발생하는 고장에 의한 터빈의 비틀림 토크를 고려할 때 발전기에서 발생하는 외부 충격은 SS조건 (Steady-State조건)과 SC조건 (Short Circuit 조건), 그리고 SOP조건 (Synchronize Out of Phase)으로 이 조건은 크기에서 SS < SC < SOP 조건이 성립한다. 따라서 SS조건은 피로 곡선에서 스트레스가 아무리 많아도 영원히 피로가 누적되지 않는 피로곡선 한도 이내로

설계한다.

SC조건과 SOP조건은 그림 1의 b)에서 보여주고 있는 스트레스 곡선에 따라 만들어지고, 터빈을 설계하는 경우에 전단 응력(σ_{smax})은 그림 5에서 보여주는 터빈과 터빈사이의 이음새(R₀)에 주로 인가되기 때문에 터빈을 설계할 때 SC조건과 SOP조건을 고려하는 경우에는 전단 응력(σ_{smax})은 1/R₀에 비례하기 때문에 가혹한 조건에서 터빈이 안전하게 동작하도록 하기 위해서는 터빈의 R₀ 반경을 좀 더 크게 하여 터빈의 안전율을 높여야 한다. 특히 터빈의 스트레스는 직경이 작고 불연속적인 부분에서 파손이 많기 때문에 R01 부분의 정밀 점검 또는 보강이 있어야 한다.

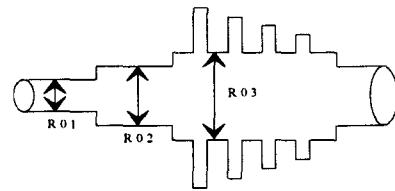


그림 5. 상세한 터빈의 구조
Fig. 5 Detailed Turbine Structure

터빈의 스트레스 피로는 앞에서 고려한 것과 같이 터빈을 가/감발하는 경우와 AC 계통에서 고장이 생기는 경우에 AC계통과 터빈-발전기의 전력 불균형에 따라 생길 수 있는데, 대개 이러한 것은 터빈을 제작하는 제작사에서 터빈을 설계할 때 가/감발의 횟수와 AC계통 고장의 횟수를 가정하여 설계 제작한다. 이때 SS조건에서는 터빈-발전기가 영원히 피로와는 상관없이 설계되어져야 하고, SC조건 중에서도 3상 단락이 일어날 수 있는 횟수, 단상지락이 일어날 수 있는 횟수 그리고 SOP조건이 일어날 수 있는 횟수를 가정하여 설계하는데, 실제적으로 단상지락 조건이 일어나는 확률보다는 3상 지락 그리고 3상 지락보다는 동기 탈조 조건이 일어날 확률이 적기 때문에 제작사에서 각각의 경우에 따른 터빈-발전기의 스트레스-피로 곡선을 가정한다. 그러나 이러한 가정은 순수한 AC 계통을 기준으로 만든 것이며, 터빈-발전기가 HVDC단의 정류기 단에 있는지 아니면 인버터 단에 있는지에 따라 달라진다. 예를 들어 AC계통에서는 동기 탈조를 제외하고 3상 지락 사고와 선간단락이 AC계통사고 중에서는 가장 가혹한 조건이나 HVDC의 경우에는, 근거리 3상 지락사고가 가장 가혹한 고장이 되며, 이외의 것은 HVDC의 용량과 파라미터 그리고 계통 조건에 따른 따른다.

4. HVDC인버터 단에서 정류실패가 터빈-발전기에 미치는 영향

본 장에서는 2장과 3장에서 논한 기술적인 내용을 이용하여 실제적으로 HVDC단에 연결된 발전기의 터빈의 스트레스를 분석하기 위하여 HVDC시스템과 HVDC인버터 단에 연결된 터빈-발전기 시스템 그리고 HVDC인버터 단에 연결된 AC 계통과 시스템 운전조건을 사전에 정의하기로 하겠다.

1장에서도 간략하게 언급한 것과 같이 HVDC시스템과 스트레스와 관련된 AC계통사이의 관계는 전력을 보내는 HVDC 정류기 단에 연결된 발전기와 AC계통사이의 연관성은 전력을 받는 HVDC인버터 단에 연결된 발전기와 AC계통사이의 연관성과는 다른 결과를 가질 수 있다. 이러한 이유는 HVDC인버터 단에서는 HVDC 정류기 단에서 가지지 않는 전압강하에 의한 정류실패가 존재하며, 정류실패도 고장위치에 따른 HVDC 모선 전압의 크기에 따라 정해지고, 12펄스용 HVDC Y-△변압기에 따라 다르게 나타나기 때문에 W. Shie가 주장하는 HVDC시스템은 AC계통의 고장위치에 덜 민감하다는 결과가 HVDC 인버터 단에서는 타당하지 않다고 볼 수 있다. AC계통 고장에 따른 인버터 단의 정류실패에 관한 수학적 모델링은 다음과 같다.[8] 식 (13)과 식 (14)는 운전조건에 따라 정류실패가 일어날 수 있는 정류실패의 임계전압(ΔV)을 나타내고 있는 것이며, 식 (13)은 3상 지락이 발생한 경우의 정류실패를 발생시키는 임계전압에 관한 수식이며, 식 (14)는 단상 지락이 발생한 경우의 정류실패를 발생시키는 임계전압에 관한 수식을 보여준다.

$$\Delta V = 1 - \frac{I_d'}{I_d} \frac{(I_d/I_{dFL})X_{cpu}}{(I_d/I_{dFL})X_{cpu} + \cos\gamma_0 - \cos\gamma} \quad (13)$$

$$\Delta V = 1 - \frac{I_d'}{I_d} \frac{(I_d/I_{dFL})X_{cpu}}{(I_d/I_{dFL})X_{cpu} + \cos(\gamma_0 + \phi) - \cos\gamma} \quad (14)$$

여기서, $\phi = 30^\circ - \tan^{-1}\left[\frac{\sqrt{3}/2}{1/2 + 1/(1-\Delta V)}\right]$, X_{cpu} = 누설인덕턴스, I_d 는 DC 전류, I_d' 는 새로운 DC전류, γ_0 는 임계소호각 그리고, γ 는 운전 소호각이다.

그리고 정류실패도 모든 DC 전류가 싸이리스터를 통하여 AC계통에 유입되지 않고 단락 상태로 DC 케이블로 유입되는 완전 정류실패와 부분적으로 AC계통에 유입되는 부분 정류실패로 나뉘어질 수 있는데, 부분 정류실패는 위에서 논한 정류실패를 발생시키는 임계전압과 12펄스용 HVDC모선 변압기의 형태에 달려 있다.

HVDC 시스템의 AC/DC변압기는 1차 측이 Y결선이며, 2차 측은 Y-△결선으로 연결되어 있다. 이때, 1차 측에서 원거리 지락 사고가 발생하면 변압기 2차 측의 Δ결선 쪽에 연결된 밸브의 싸이리스터 정류 전압은 2상의 위상이 줄어들고, 나머지 한 상의 위상은 늘어난다. 따라서, 2상에서 정류 실패가 일어나는 반면, 변압기 2차 측의 Y결선 측에 연결된 밸브의 싸이리스터 정류 전압은 1상만이 위상 변화를 일으키고 나머지 2상의 위상은 변화가 없다. 따라서, 한 상이 정류 실패를 일으키고 다른 2상은 정류 실패를 일으키지 않는다. 그림 6은 변압기 결선에 따라 정류 실패가 일어나는 이유를 설명하는 벡터 도를 보여 주고 있다. 그림 6에서 $\Delta\theta(\theta - \theta')$ 는 한 상의 전압이 감소하면 위에서 논한 전압감소에 따른 위상 변화 이외에도 Y결선과 △결선의 차이에서 생기는 추가적인 위상 변화를 나타내고 있다.

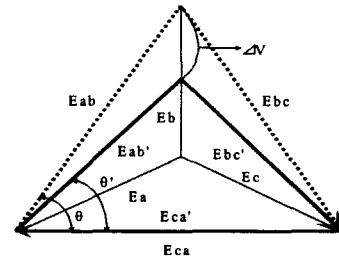


그림 6 정류 전압의 감소에 따른 정류 소호 각의 변화
Fig. 6 Commutation Extinction Angle Changing due to Commutation Voltage Reduction.

여기서, 우리가 중요하게 가정해야 하는 점은 HVDC시스템의 제어기를 들 수 있는데, HVDC 시스템의 제어기가 속응성이 좋다면, 정류실패가 일어나는 정류실패를 발생시키는 임계전압이 낮아도 되나, 일단 정류실패가 일어나면 제어기의 특성상 높은 과도 DC전압을 발생시키며, HVDC 시스템의 정류기 단과 인버터 단에 과 전류에 의한 정류실패를 유발하고 시스템을 공진시키는 원인이 되기 때문에 제어기의 정류실패를 발생시키는 임계전압과 속응성은 반비례관계를 갖는다. 따라서 좋은 시스템은 정류실패를 발생시키는 임계전압과 속응성을 적절하게 조화시키는 것이 제어의 기본이다.

5. 시뮬레이션 및 결과 검토

본 논문에서는 서론에서 논한 내용을 증명하기 위해 발전기의 스트레스 해석 대상으로 삼은 것은 제주-해남 HVDC 시스템의 제주지역 발전기로서, 제주-해남 HVDC시스템은 다른 나라의 HVDC 시스템과는 달리 독특한 제어방식을 갖는 것으로써 계통이 약한 제주지역이 인버터지역이며 상대적으로 계통이 강한 해남지역이 정류기 단이다. 그리고 제주지역 총 부하의 60%를 HVDC 시스템이 담당하고 있다. 그림 7은 HVDC 시스템과 제주계통의 단결선도를 보여주고 있다.

또한, 터빈에 인가되는 비틀림 토크가 피로현상을 유발하는 토크의 크기는 부록 2에서 보여주는 데이터와 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 그림 1과 같은 피로곡선을 만들어 고장시에 피로를 유발하는 토크의 개수를 구하고, 이 개수를 Goodman 라인을 이용하여 피로곡선을 구한다. 터빈-발전기 시스템에서 비틀림 토크가 가장 문제가 되는 곳은 LP-A터빈과 LP-B터빈으로써 이것은 HP터빈과 같이 작은 중량의 터빈이 LP터빈과 같이 큰 중량의 터빈에 달려 있기 때문에 LP-A터빈부분에서 중량과 직경의 불연속에 의한 균열이 일어나기가 쉽기 때문이며, 또한 LP-B터빈과 발전기사이에서도 중량과 직경차이에 의한 토크 불연속이 일어나는 문제가 있다. 따라서 비틀림 토크에 의한 토크의 스트레스는 대부분 LP터빈 측에서 발생한다. 제주-해남 HVDC시스템에 연결된 터빈-발전기 시스템에서 LP터빈에 피로를 유발하는 토크 크기는 1.2[p.u]이상 되는 토크로써 터빈-발전기 시스템에서 비틀림

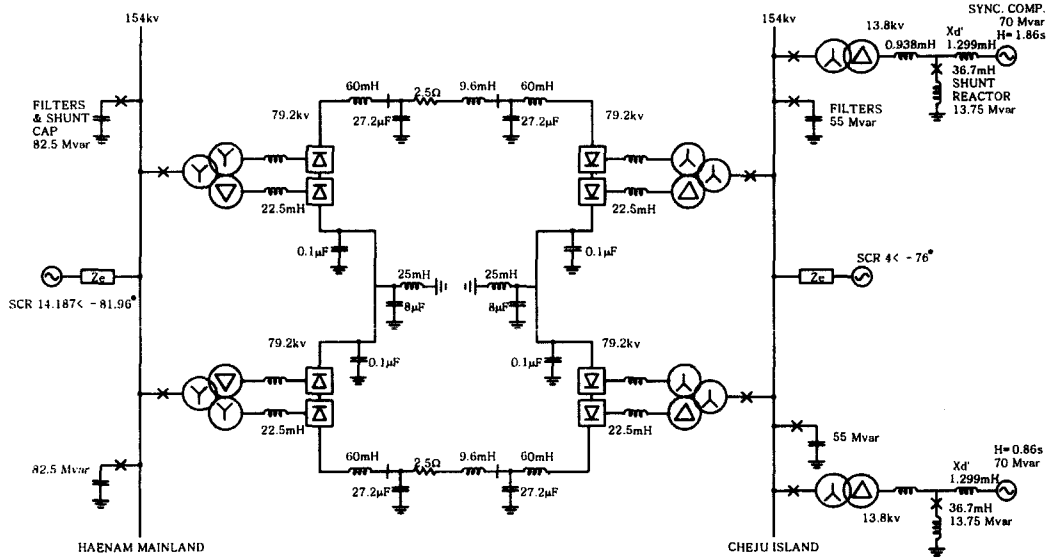


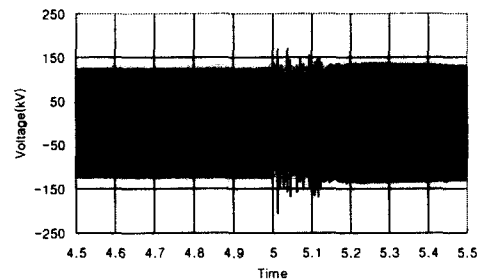
그림 7 제주-해남 HVDC 단 결선도
 Fig. 7 Cheju-Haenam HVDC schematic diagram

토크가 1.2[p.u] 이상 되는 토크의 개수를 피로곡선에 대입하면 피로 상태와 터빈의 수명이 결정된다. 참고적으로 부록 2에서 보여주는 재질에 따른 피로 상수는 터빈-발전기를 제작하는 회사에서 기밀사항으로 취급하는 사항으로써 실제의 제주에서 운전되는 터빈-발전기의 피로상수와는 차이가 있으나 부록 2의 데이터는 IEE에 발표된 논문에서 인용하였으며 실제의 데이터와는 오차율이 20% 이내이다[4].

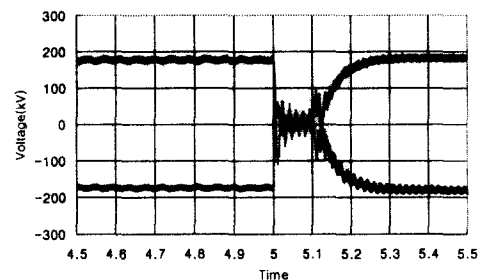
시뮬레이션에 관한 파형을 설명하면 다음과 같다. 그림 8은 5초에서 5.1초까지 0.1초 동안 제주 AC계통에서 근거리 단상 지락 고장이 발생한 경우에 HVDC 전류, 전압 파형과 HVDC보선에 연결된 터빈-발전기 축의 비틀림 토크를 보여주고 있다. 그림 8 a)는 제주 지역의 AC계통전압을 보여주고 있으며, 그림 8 b)에서 상반된 파형은 180[kV]의 정류기 전압과 -180[kV]의 인버터 파형을 보여주고 있는 것이다. 그리고 그림 8 c)의 파형은 정류기 DC전류(점선)와 인버터 단의 DC전류(실선)를 보여주고 있는 것으로 케이블의 충전 전류에 의해 정류기 단의 전류보다 인버터 단의 전류가 더 크게 나타나는 것으로 이러한 점도 인버터 단에서 지락이 발생하는 경우에 발전기에 가해지는 충격과 정류기 단에서 지락이 발생하는 경우에 발전기에 가해지는 충격이 다른 예를 보여주고 있다. 그리고 그림 8 d)는 HP터빈과 IP터빈 사이의 축 비틀림 토크를 보여주고 있으며, 그림 8 e)는 IP터빈과 LP-A터빈 사이의 축 비틀림 토크, 그림 8 f)는 LP-A터빈과 LP-B터빈 사이의 축 비틀림 토크, 그림 8 g)는 LP-B터빈과 발전기사이의 축 비틀림 토크, 그리고 그림 8 h)는 발전기와 AC형 여자기 사이의 축 비틀림 토크를 보여주고 있다. 그림 8에서 LP-B와 발전기 사이의 축 비틀림 토크가 고장 시에 정상 상태보다 2배 이상의 축 비틀림 토크가 인가되는 것이 관측되고 있으며, 발전기와 여자기 사이의 축 비틀림은 무시할 만큼 작다는 것을 알 수 있다. 그림 9는 제주 인버터 지역의 AC계통에서 3상 지락 사고가 발생

한 경우의 터빈-발전기 축 비틀림 토크를 보여주고 있는 것으로 LP-A터빈과 LP-B터빈사이의 축 비틀림 토크와 LP-B터빈과 발전기사이의 축 비틀림 토크가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

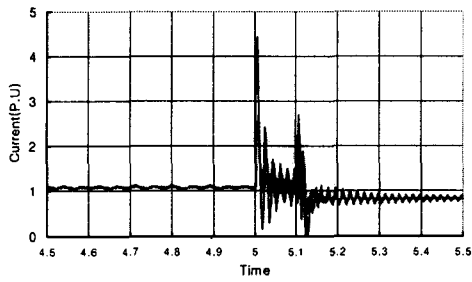
여기에서 우리가 알 수 있는 것은 HVDC시스템에서도 인버터 측 3상 지락 사고가 발전기에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있고, 발전기의 용량에 비해서 HVDC 시스템의 용량이 얼마나 큰가에 따라 발전기의 축 비틀림 토크가 결정된다는 것을 알 수 있다.



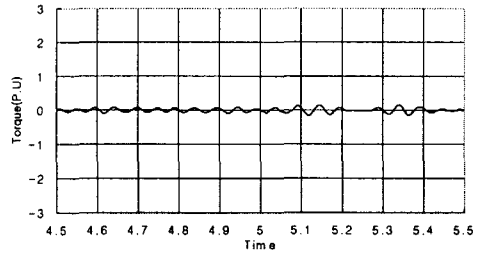
a) AC계통 전압



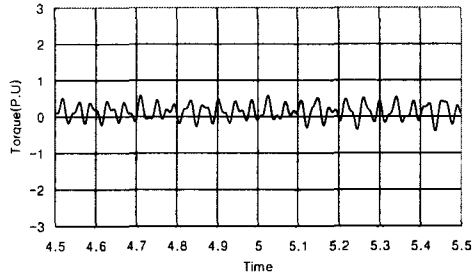
b) HVDC 전압파형



c) HVDC 전류파형



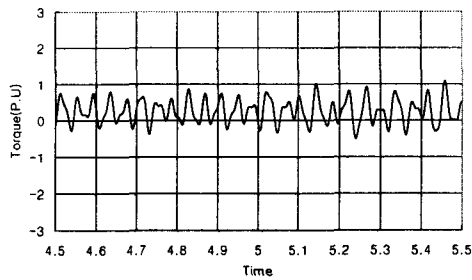
h) 발전기와 AC형 여자기사이의 토크



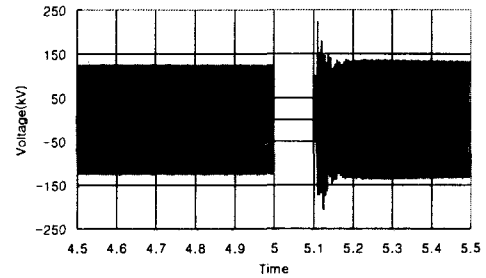
d) HP와 IP사이의 비틀림 토크

그림 8 AC계통에서 근거리 단상 고장이 발생한 경우의 HVDC를 포함한 발전기 토크 파형

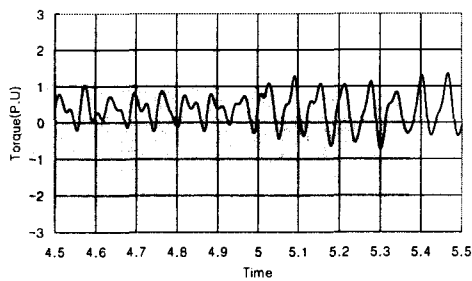
Fig. 8 Turbine-generator torque waveforms and HVDC waveforms when single-phase AC fault was generated near the inverter terminal.



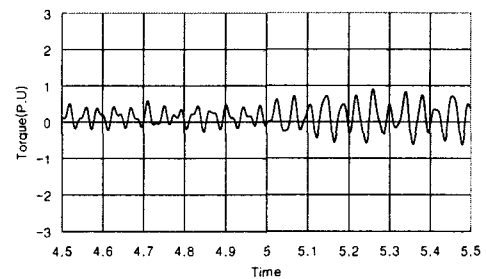
e) IP와 LP-A사이의 비틀림 토크



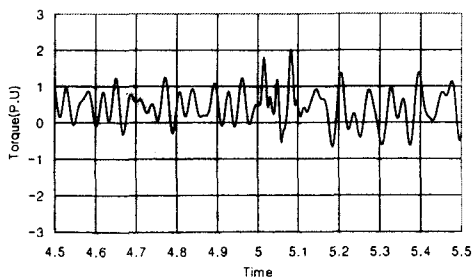
a) AC전압 파형



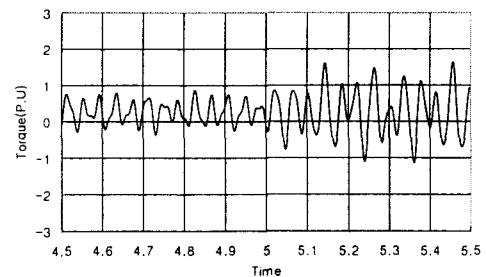
f) LP-A와 LP-B사이의 토크



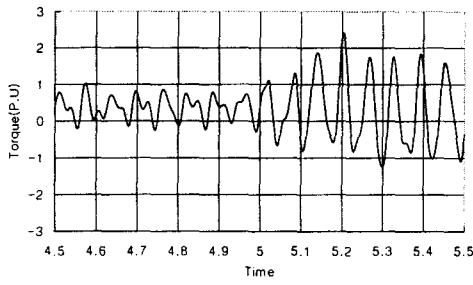
b) HP와 IP사이의 토크



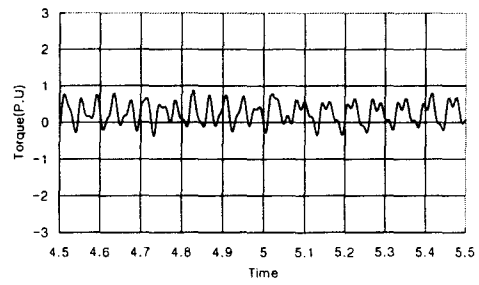
g) LP-B와 발전기사이의 토크



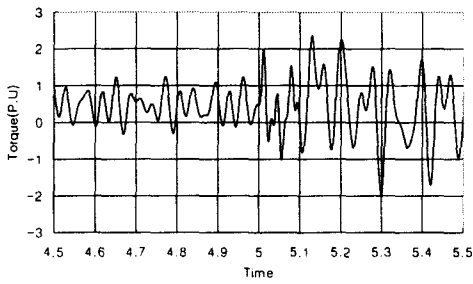
c) IP와 LP-A사이의 토크



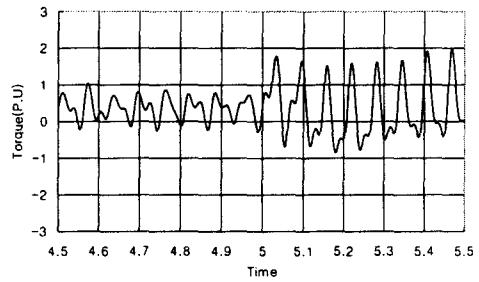
d) LP-A와 LP-B사이의 토크



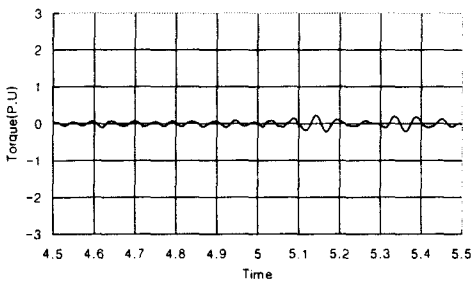
b) IP와 LP-A사이의 토크



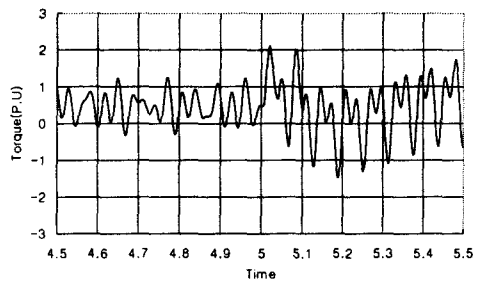
e) LP-B와 발전기사이의 토크



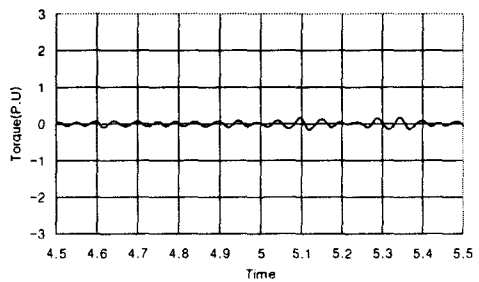
c) LP-A와 LP-B사이의 토크



f) 발전기와 AC형 여자기 사이의 토크



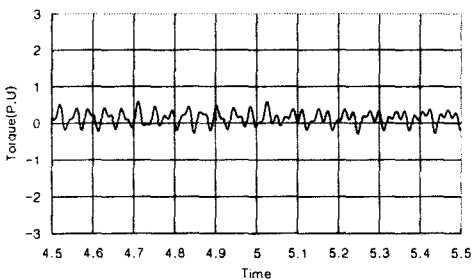
d) LP-B와 발전기사이의 토크



e) 발전기와 AC형 여자기 사이의 토크

그림 9 AC계통에서 근 거리 3상고장이 발생한 경우의 AC파형과 터빈-발전기 토크 파형

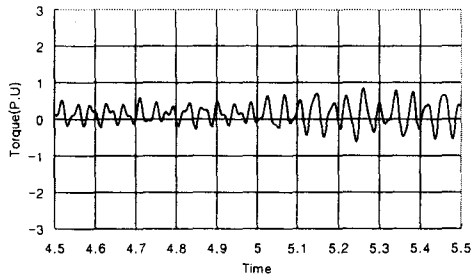
Fig. 9 Turbine-generator torque waveforms and AC waveform when three-phase AC fault was generated near the inverter terminal .



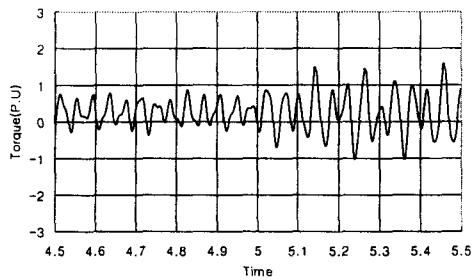
a) HP와 IP사이의 토크

그림 10 AC계통에서 원거리 단상 고장이 발생한 경우의 터빈-발전기 토크 파형

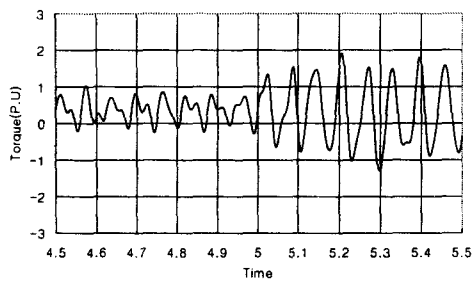
Fig. 10 Turbine-generator torque waveforms and HVDC waveforms when distant single-phase AC fault was generated at the inverter terminal.



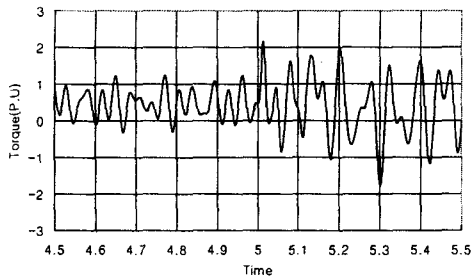
a) HP와 IP사이의 토크



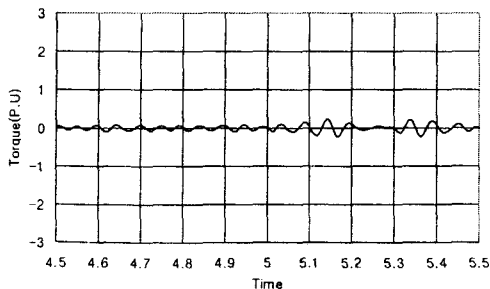
b) IP와 LP-A사이의 토크



c) LP-A와 LP-B사이의 토크



d) LP-B와 발전기 사이의 토크



e) 발전기와 AC형 여자기 사이의 토크

그림 11 AC계통에서 원거리 3상고장이 발생한 경우의 터빈-발전기 토크 파형

Fig. 11 Turbine-generator torque waveforms when distant three-phase AC fault was generated at the inverter terminal.

한편 그림 10은 제주 인버터 AC 계통에서 원거리 단상 고장이 발생한 경우에 터빈-발전기 축 비틀림 토크를 보여주고 있는 것으로 근거리 단상 고장과 비교하여 부분 정류실패를 유발하여 예측 불허의 축 비틀림 토크가 발생됨을 알 수 있다. 그림 11은 제주 인버터 AC계통에서 원거리 3상고장이 발생한 경우에 터빈-발전기 축 비틀림 토크를 보여주고 있으며 근거리 3상고장보다는 축 비틀림 토크의 크기가 작으며, 원거리 단상지락 보다는 양호한 결과를 보여주고 있다. 따라서, 이러한 경우는 순수한 AC계통에서 계통사고에 따른 터빈-발전기 스트레스 이론이 HVDC시스템에서 그대로 성립하지 않는다는 것을 보여주고, HVDC시스템은 계통 사고 위치에 덜 민감하다는 주장이 정류기 단에서는 타당하지 않다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 HVDC 인버터 단에 연결된 터빈-발전기의 스트레스분석을 수행하였으며 기존의 논문에서 주장하는 결론과 다른 결론을 요약하면 다음과 같다.

- HVDC 인버터 단에 연결된 터빈-발전기의 스트레스는 HVDC 인버터의 정류실패에 의해서 인버터 단의 AC계통 고장위치에 아주 민감하다.

- HVDC 인버터 단에 연결된 터빈-발전기 스트레스는 근거리 AC계통 3상고장이 가장 심각한 고장이나, 원거리 AC계통 단상고장과 근거리 AC계통 단상고장의 경우는 비교할 수 없고 HVDC 운전조건과 AC계통조건에 따른다.

참 고 문 헌

- [1] S.O. Faried, etc., "Effect of HVDC Converter Station Faults on Turbine-Generator Shaft Torsional Torque", IEEE Tran. on Power System, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 875~881.
- [2] M. R. Iravani etc., "Impact of Inverter Station on Torsional Dynamics of Parallel HVDC-AC Power System", IEEE Tran. on Power System, Vol. 8, No. 3, Aug. 1993, pp. 997~1003.
- [3] M.R.Iravani, "A Method for Reducing Transient Torsional Stress of Turbine-Generator Shaft Segments", IEEE Tran. Power System, Vol. 7, No. 1, Feb., 1992.
- [4] C. Chyn, "Torsional Fatigue of Turbine-Generator Shafts Owing to Network Fault", IEE Proc. Vol.143.

No. 5. Sept. 1996.

- [5] W. Shi etc., "Effect of HVDC Line Faults on Transient Torsional Torques of Turbine-Generator Shafts", IEEE Tran. on Power System, Vol. 9, No. 3, Aug. 1994, pp. 1457~1463.
- [6] D.G. Ramey, "Important Parameters in Considering Transient Torques on Turbine-Generator Shaft System", IEEE Tran. on PAS, Vol. PAS-99, No. 1 1980, pp 311~317.
- [7] T.J. Hammons, etc, "Stressing Turbine-Generator-Exciter Shafts by Variable Frequency Currents Superimposed on DC Currents in Asynchronous HVDC Links and Following Disturbances at Converter Stations", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 3, September 1994, pp. 503~pp.512.
- [8] C.V Thio, "Commutation Failures in HVDC Transmission Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April, 1996, pp 946~957.

부록 1. HVDC 운전 데이터

- 정격전압 : 184[kV]
- 정격전류 : 840[A]
- 운전용량 : 150[MW]
- 설비용량 : 300[MW]
- 운전 각도 : $\gamma = 28$ 도(제주), $\alpha = 23.5$ 도(해남)
입계 $\gamma = 8$ 도
- AC/DC 변압기 인덕턴스 : 12%

부록 2. 재질에 따른 피로상수

	Materials		
	NiMoV	NiCrMoV	CrMoV
E(MPa)	201,000	200,000	204,000
(psi)	29,200K	29,000K	29,600K
H(MPa)	726.7	689.5	748.8
(psi)	105,400	100,000	108,600
S	0.075	0.061	0.060
A	0.0037	0.0034	0.004
α	-0.55	-0.043	-0.051
B	1.34	1.14	2.6
β	-0.71	-0.69	-0.79
G(MPa)	82,760	80,680	82,760
(psi)	12,000K	11,700K	12000K
H'(Mpa)	387	426	451
(psi)	56,180	61,750	65,430
S'	0.074	0.087	0.082
A'	0.0048	0.0055	0.0059
α'	-0.043	-0.054	-0.052
B'	1.24	1.69	1.69
β'	-0.59	-0.62	-0.64

부록 3. AC계통 상수

해남 AC 계통의 저항(R)	0.00657[p.u]
해남 AC 계통의 리액티브(X)	0.04653[p.u]
제주 AC 계통의 저항(R)	0.0384[p.u]
제주 AC 계통의 리액티브(X)	0.16174[p.u]
해남 AC 계통 SCR	14.1876 \angle -81.96
제주 AC 계통 SCR	4.010 \angle -76.64

부록 4. 제주 발전기 상수

정격(15℃)	BASE	PEAK
KVA	70,000	74,900
KW	63,000	67,410
역율	0.9	0.9
전압(V)	13,800	3,800
전류(A)	2,929	3,143
Speed(rpm)	3,600	3,600
단락비	≥ 0.5	≥ 0.5

- 회전자 관성(GD²) : 7,315[kg m²]
- 동기 임피던스(X_d) : 220%
- 포화 과도 임피던스(X'_{dv}) : 18%
- 포화 임계 임피던스(X''_{dv}) : 12.5%
- 비포화 역상 임피던스(X₂) : 18%
- 비포화 영상 임피던스(X₀) : 8%

- 여자 시스템

- 정격 : 150[KW], 300[V], 500[A], 3,600[RPM]
- 정상 전압 : 450[V]

저 자 소 개



김 찬 기 (金 燦 起)

1968년 12월 17일 생. 충북 충주. 1991년
서울 산업 대학교 전기공학과 졸업. 1993
년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1996년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업
(공학), 1996년 전력연구원 입사. 현재 전

력 연구원 선임 연구원.

Tel : 042-865-5892, Fax : 042-0865-5844

E-mail : ckkim@kepri.re.kr