

인출선로 재폐로에 따른 발전기 축비틀림 토크 분석

이동규\*, 김형규\*, 강상희\*, 주행로\*\*, 유영식\*\*  
 명지대학교\*, 한국전력거래소\*\*

Torsional Torque Analysis of Turbine-generator Shafts  
 according to Reclosing Schemes

Dong-Gyu Lee\*, Hyung-Kyu Kim, Sang-Hee Kang\*, Haeng-Ro Joo\*\*, Young-Sik Lyu\*\*  
 Myongji University\*, Korea Power Exchange\*\*

**Abstract** - 고속 자동 재폐로 방식은 고장 구간의 신속한 자동 복구로 전력계통의 안정도 및 신뢰도를 향상시킬 수 있으나 재폐로 실패시 고장 발생 및 차단 순간의 충격과 재폐로에 의한 충격이 연쇄적으로 발전기 회전축에 작용하므로 매우 큰 비틀림 충격이 발생될 수 있다. 본 논문에서는 발전기 인출단 대용량 송전선로의 재폐로시 발전기 축에 가해지는 충격을 분석하기 위해 EMT-P-RV를 이용하여 765kV 송전선로에 연결된 4기의 발전기를 다중 질량제로 모델링하고, 인출 선로 고장 및 재폐로 방식에 따른 발전기 축 비틀림 토크를 분석하였다.

중 질량제로 모델링하고, 인출 선로 고장 및 재폐로 방식에 따른 발전기 축 비틀림 토크를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 자동 재폐로 방식

현재 국내에 적용되고 있는 자동 재폐로 방식은 표 1과 같이 765kV에서는 다상 재폐로, 345kV에서는 1+3상 재폐로, 154kV 이하에서는 3상 재폐로 방식을 적용하고 있다.

표 1. 재폐로 방식 및 시간

전압[kV]	재폐로 방식	재폐로 시간
154	3상 재폐로	18/26 Cycle
345	단상 + 3상 재폐로	3상 : 24 Cycle 1상 : 48 Cycle
765	다상 재폐로	60 Cycle

1. 서 론

자동 재폐로 방식은 고장 구간의 신속한 자동 복구를 통한 전력계통의 안정도 및 신뢰도 향상을 목적으로 운용되며, 일반적으로 선로의 전압 계급에 따라 재폐로 방식이 계통의 과도 안정도에 미치는 영향을 고려하여 적절 재폐로 방식을 결정한다.

송전선로에서 영구고장이 발생한 선로가 재폐로에 의해 재투입 되거나, 순간고장 일지라도 고장 부위의 절연 회복이 불충분할 때 자동 재폐로로 인하여 고장이 다시 발생하면 전력기에 전기적, 기계적 충격이 가해질 수 있다. 그 중에서 가장 심각한 문제로 제기되는 것은 회전축(shaft)의 길이가 긴 대용량 터빈 발전기에서 발생하는 비틀림 토크(torsional torque)이다. 고장 발생, 재폐로 실패 등과 같은 계통의 외란에 의한 비틀림 토크 등의 기계적 충격은 발전기 출력이 클수록, 외란의 발생 지점이 전기적으로 가까울수록 더욱 큰 영향을 미치며, 심각한 경우 발전기 회전축이 파손되는 경우도 발생할 수 있다.

해외에서는 발전기의 축 비틀림 현상의 분석을 위해 발전기 인출 선로가 적절 보상된 계통 모델들이 제시되었으며[1-2], 부하차단 또는 발전기의 비동기 투입 등과 같은 외란 발생시 발전기 축에 가해지는 충격을 분석하거나[3], 인출 선로에 다양한 고장이 발생했을 때 발전기 축에 발생하는 비틀림 토크의 분석[4] 등과 같은 연구 결과들이 발표되었다. 국내에서는 345kV 영흥도 등가 계통에 대해 재폐로 방식에 따른 발전기 축비틀림을 연구한 바[5]가 있으나, 발전기의 전기적, 기계적 파라메타는 IEEE 2nd benchmark 모델[2]의 값을 사용하였다.

발전기의 기계적 소손은 계통 안정도에 심각한 영향을 미칠 뿐만 아니라, 경제적 손실 또한 크기 때문에 765kV 선로와 같은 대용량 인출 선로가 연결되는 발전기의 경우 터빈-발전기에 가해지는 충격을 최소화시키는 자동 재폐로 방식을 사용하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 발전기 인출단 대용량 송전선로의 재폐로시 발전기 축에 가해지는 충격을 분석하기 위해 EMT-P-RV를 이용하여 765kV 송전선로에 연결된 4기의 발전기를 다

발전기 인출 송전 선로의 재폐로 성공시에는 터빈-발전기 축에 가해지는 충격 또는 피로(fatigue)가 큰 문제가 되지 않으나, 재폐로 실패시에는 고장 발생 및 차단 순간의 충격에 의한 비틀림 진동에 이어 재폐로에 의한 연쇄적 충격이 크게 작용한다. 즉 고장 발생과 차단에 의한 충격으로 발생된 회전축 토크의 위상과 재폐로 실패시 발생된 두 번째 충격의 위상이 중첩되는 경우에는 매우 큰 비틀림 충격이 발생되어 회전축이 파손되는 경우도 발생할 수 있다.

계통의 외란에 의한 기계적 충격은 발전기 출력이 클수록, 외란의 발생 지점이 발전기로부터 전기적으로 가까울수록 더욱 심각하게 발생한다. 이에 대한 대응책은 고속 재폐로를 금지하거나 또는 무전압 시간을 길게하여 초기 고장에 의하여 회전축에 발생된 비틀림 진동이 충분히 감소된 후에 재폐로하는 방식 등이 있다. 그러나 고속 자동 재폐로 방식을 사용함으로써 얻을 수 있는 계통 운용상의 장점이 적지 않기 때문에 자동 재폐로 방식을 사용하지 않는 것보다 재폐로 방식을 적용하되 되도록 터빈-발전기에 가해지는 충격을 최소화시키는 자동 재폐로 방식을 검토해야 한다.

2.2 계통 구성 및 발전기 모델링

그림 1은 765kV 대용량 송전선로의 재폐로 방식에 따른 발전기 축 비틀림 토크를 분석하기 위한 모델 계통을 보인 것이다. 612MVA, 22kV 발전기 4대가 각각의 델타-와이 결선 승압 변압기를 통해 2회선 송전선로에 연결되어 있으며, 765kV 송전선로는 주파수 의존(Frequency Dependent) 모델로 모델링 하였다. 동기 발전기의 전기적 데이터는 표 2와 같다.

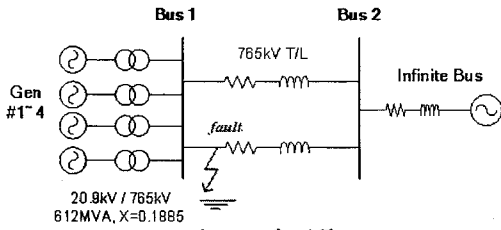


그림 1. 모델 계통

표 2. 발전기 전기적 데이터

Gen #1*2, 612MVA, 22kV			
XI	0.1450	X0	0.1250
Xd	1.7241	Xq	1.6587
X'd	0.2586	X'q	0.4524
X''d	0.2029	X''q	0.2029
T'do	3.8260	T'qo	0.5084
T''do	0.0316	T''qo	0.0592
Gen #3*4, 612MVA, 22kV			
XI	0.1420	X0	0.1393
Xd	2.2140	Xq	1.5620
X'd	0.2340	X'q	0.3520
X''d	0.2040	X''q	0.2040
T'do	7.5000	T'qo	0.7350
T''do	0.0410	T''qo	0.0500

그림 2는 발전기 질량체간 비틀림 토크를 분석하기 위한 다중 질량체 모델을 보인 것이다. 본 논문에서는 4개의 질량체로 동기 발전기를 모델링하였으며, 각 질량체별 기계적 데이터는 표 2와 같다. 기계적 데이터 중 각 질량체의 뎀핑 계수(Damping Coefficient)는 비틀림 토크에 큰 영향을 주지 않으므로 생략하였다.[6]

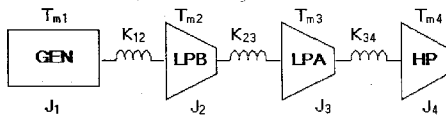


그림 2. 발전기 다중 질량체 모델

표 3. 발전기 기계적 데이터

Mass	Fraction of External Torque	Moment of Inertia (kgm <sup>2</sup> )	Spring Constant (Nm/rad)
Gen #1*2			
Gen	0.000	7080.0	
LPB	0.215	10203.5	132.58E06
LPA	0.215	10100.3	132.58E06
HP	0.570	2211.0	67.96E06
Gen #3*4			
Gen	0.000	8743.0	
LPB	0.187	15115.6	132.58E06
LPA	0.187	14921.3	132.58E06
HP	0.626	2585.1	67.96E06

### 2.3 사례 연구

인출선로 재폐로에 따른 발전기 축 비틀림을 분석하기 위한 모의 케이스는 표 4와 같다. 고장 위치는 그림 1에서 보이는 것과 같이 터빈-발전기에 큰 기계적 충격을 줄 수 있는 발전 모선(Bus1) 근접 고장을 상정하였다.

표 4. 모의 케이스

고장 종류	재폐로 방식	재폐로 시간
A상 지락	단상 재폐로	40~80Cycle step : 2Cycle
A-B 단락	다상 재폐로	
	3상 재폐로	

그림 4 및 5는 계통에 의란이 발생했을 경우 질량체간 속도차에 의해 발전기 축에 발생하는 토크에 대한 일례를 보인 것이다. 그림 4는 A상 지락 고장 발생시 60 Cycle 단상 재폐로를 실시했을 때의 각 질량체 사이에 발생하는 질량체간 토크를 도시한 것으로 질량체간 토크는 질량체 간의 기계적 토크의 차로 아래와 같이 계산된다.

$$\text{질량체간 토크} = T_{m(i)} - T_{m(i+1)} \text{ [pu]}$$

그림 5는 A-B 단락 고장 발생시 60 Cycle 다상 재폐로를 실시했을 때의 결과이다.

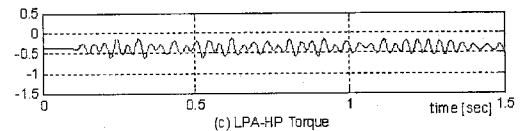
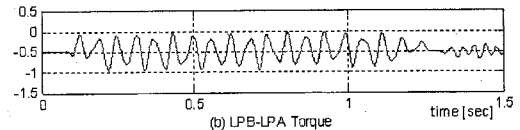
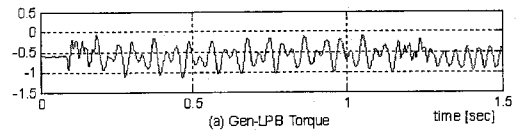


그림 4. Gen #4의 질량체간 토크 (A상 지락 고장, 60Cycle 단상 재폐로)

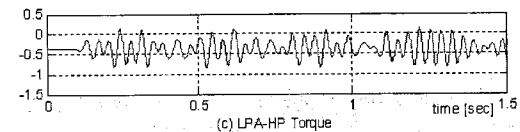
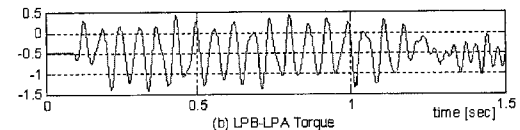
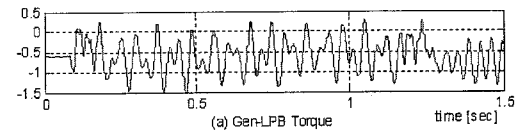


그림 5. Gen #4의 질량체간 토크 (A-B 단락 고장, 60Cycle 다상 재폐로)

표 5. Gen-LPB 비틀림 토크

재페로 시간 (Cycle)	지락고장	단락고장	
	단상재페로	3상재페로	다상재페로
40	0.950	1.177	1.173
42	0.930	1.295	1.297
44	0.692	0.990	0.988
46	0.799	1.193	1.200
48	0.538	0.670	0.669
50	0.585	0.915	0.916
52	0.624	0.713	0.712
54	0.888	1.173	1.175
56	0.689	0.930	0.927
58	1.043	1.365	1.363
60	0.734	1.054	1.057
62	0.771	1.161	1.163
64	0.571	0.909	0.920
66	0.541	0.838	0.836
68	0.661	0.952	0.950
70	0.702	0.894	0.891
72	0.882	1.239	1.239
74	0.726	0.968	0.962
76	0.839	1.132	1.134
78	0.538	0.820	0.820
80	0.538	0.567	0.565

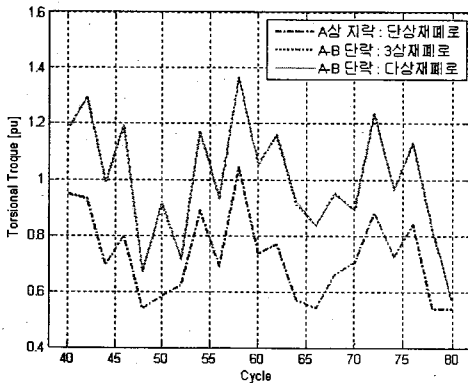


그림 6. Gen-LPB 비틀림 토크

표 5는 고장 종류, 재페로 방식 및 시간에 따른 저압 터빈-발전기 사이의 비틀림 토크를 정리한 것이며, 그림 6은 이를 도시한 것이다. 비틀림 토크는 아래와 같이 정의된다.[2]

$$\text{비틀림 토크} = \frac{\text{최대 토크} - \text{최소 토크}}{2} \text{ [pu]}$$

이상의 사례연구를 통하여 터빈 발전기 축에서 발생하는 비틀림 토크는 저압 터빈-발전기 사이에서 가장 크게 발생하며, 단상/3상 재페로 방식에 비해 다상 재페로 방식을 적용하였을 때 비틀림 토크가 미소하게 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

### 3. 결 론

고장 구간의 신속한 자동 복구를 통한 전력계통의 안정도 및 신뢰도 향상을 목적으로 실시하는 자동 재페로는 재페로 실패시 고장 발생 및 차단 순간의 충격과 재페로에 의한 연쇄적 충격이 발전기 회전축에 작용하므로 매우 큰 비틀림 충격이 발생될 수 있다.

본 논문에서는 발전기 인출단 대용량 송전선로의 재페로시 발전기 축에 가해지는 충격을 분석하기 위해 EMTP-RV를 이용하여 765kV 송전선로에 연결된 4기의 발전기를 다중 질량체로 모델링하고, 인출 선로 고장 및 재페로 방식에 따른 발전기 축 비틀림 토크를 분석하였다.

향후 재페로 투입시 동기점정자 등을 반영하는 추가적인 연구가 필요하며, 연구 결과는 최적 자동 재페로 방식의 결정에 유용한 자료로 사용될 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성사업(차세대전력기술연구센터) 및 2단계 BK21 사업의 일부 지원으로 수행되었음.

#### [참 고 문 헌]

- [1] "First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 96, No. 5, pp. 1565-1572, 1977
- [2] Second Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, No. 5, p. 1057-1066, 1985
- [3] Cudworth, C.J., Smith, J.R., "Steam turbine generator shaft torque transients: a comparison of simulated and test results", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 137, No. 5, pp. 327-334, 1990
- [4] Chyn, C., Wu, R.-C., Tsao, T.-P., "Torsional fatigue of turbine-generator shafts owing to network faults", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 5, pp. 479-486, 1996
- [5] 한국전력공사, "345kV 대용량 송전선로 보호관련 전기적 특성 연구", pp. 226-239, 1998
- [6] P. M. Anderson, B. L. Agrawal, J. E. Van Ness, "Subsynchronous Resonance in Power Systems", IEEE Power Engineering Society, pp.190-193