

해양전력계통에서 한류 리액터 적용에 관한 연구

김철호¹ · 김현준² · 정현우³ · 윤경국⁴ · 김윤식⁵ · 서동환[†]

(원고접수일 : 2013년 12월 24일, 원고수정일: 2013년 1월 6일, 심사완료일 : 2013년 1월 7일)

A study on applications of current limiting reactor in marine electrical power systems

Chul-ho Kim¹ · Hyun-jun Kim² · Hyun-woo Jeong³ · Kyoung-kuk Yoon⁴ · Yoon-sik Kim⁵ · Dong-hoan Seo[†]

요약: 조선해양 및 플랜트 분야에서의 전력계통 구성은 분산 배치된 각각의 발전모선을 전기적으로 연결하여 사용한다. 이러한 방식은 다중화 된 모선이라기보다는 육상에서의 계통 연계와 동일한 개념으로 인식하는 것이 적합할 것이다. 이는 발전모선의 추가로 인하여 모선의 단락용량 또한 비례적으로 증대되기 때문이다. 단락용량의 증가는 관련 제반 비용의 상승을 초래하고 전기적 고장 발생 시에 물리적으로 연결된 모선들이 일시에 대정전(Blackout)을 발생시킬 가능성도 높아진다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 한류 리액터가 적용된 조선해양 전력계통에서 발전모선을 위상구조(Bus Topology)에 따라 분류하고 고장 종류 별로 단락전류 해석을 수행하였으며 그 결과를 상호 비교하여 장단점을 제시하였다.

주제어: 전력계통, 한류리액터, 대정전, 위상구조

Abstract: In the field of shipbuilding and marine, electrical power system is that each of the distributed bus bars is connected electrically. In this way, it would be appropriate to recognize as grid-connecting rather than the redundant bus. Short-circuit capacity of the electric power system will be increased proportionally which is due to the addition of the bus. The increase of short-circuit capacity needs high initial cost associated with equipment and can generate the blackout when the equipment with a physically connected to the bus occurs the electric failure. In order to solve these problems, marine electrical power system in which current limiting reactor has been applied is classified according to the network topology, bus network, star network and ring network. And short circuit analysis for each network is performed by the fault types. The results are presented pros and cons compared to each other.

Keywords: Electrical power system, Current limiting reactor, Blackout, Bus Topology

1. 서 론

조선해양 분야에서의 전원설비 구성은 육상과

달리 독립적인 전원 특성이 있다. 그것은 모선의 다중화(Redundancy), 분산화(Distributed generation), 물리적 격리(Isolation)등이 대표적 특성이라 할 수

[†] Corresponding Author: Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 606-791, Korea, E-mail: dhseo@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4412

1 ES Dasan, E-mail: ohluhcмик@gmail.com, Tel:010-8943-4613

2 Department of Electrical & Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: fihihhi@dreamwiz.com, Tel: 051-410-4822

3 DNV Korea LTD, E-mail: hywooj@yahoo.co.kr, Tel: 010-7152-1925

4 SeaNet Co., LTD, E-mail: navy2@daum.net, Tel: 010-5541-0424

5 Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: benkys@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4411

있다. 일반적으로 육상에 비해 독립적이며 더 가혹한 환경 하에서의 안정성 역시 중요한 요구사항 중 하나이다. 그러므로 발전기와 모선(스위치보드)으로 구성된 다수의 모선을 구성하게 된다[1]-[5]. 각 모선은 하나의 독립된 전원으로 구성되어 운영되며 각 모선 간을 연결하여 효율적, 안정적 운영이 가능하도록 구성 되어있다. 조선해양 분야에서 전력계통 중 하나의 모선을 육상 전력계통 중 하나의 계통으로 간주할 수 있으므로 각 계통간의 연결에 의해 각 모선의 단락용량, 정격용량 등이 증대되어야 한다. 분산형 전원의 계통 연계 시 문제점은 기존 계통의 사고 시 단락용량의 증대에 있다. 이러한 고장전류의 영향을 줄이고자 하는 방법 등은 크게 4가지 정도이다. 첫째는, Fault Limiting Reactor(FLR, 한류 리액터)로서 가장 경제적인 고장전류 제한방식이며 발전기 측에 직렬로 삽입하거나 모선 간에 설치하여 사용한다[6]. 그러나 계통의 전압 안정도 및 과도 안정도, 차단기의 TRV (Transient Recovery Voltage)와 RRRV (Rate of Rise of Recovery Voltage)등에 영향을 미치므로 설계 당시에 과도현상 해석 등이 필요하게 된다. 일반적으로 건식 과 유입식으로 나뉘며 정격전압 및 주파수, 허용 단락전류, 정격전류, 전압강하 등을 설계 시에 고려한다. 둘째는, Solid State Fault Current Limiters(SSFCL)로서 전력용 반도체 스위칭 소자를 이용하여 직렬 공진 또는 병렬 공진 회로를 구성하고 제어하여 정상 시 임피던스를 0으로, 고장 시 임피던스에 의한 고장 전류 제한 기능을 갖는다. 그러나 계통내의 적용점에 따른 제약은 받는다. 셋째, High Temperature Superconducting-Fault Current Limiter(HTS-FCL)인데 임계온도 이하에서 초전도 상태를 유지하며 0 임피던스로 전류가 흐른다. 그러나 임계전류 값 이상의 전류가 흐르면 초전도 성질을 잃게 되어 임피던스가 급속히 증가되어 사고전류를 제한하게 된다. 마지막으로 Is limiter(단락전류 제한기)는 정상시 Fuse와 병렬로 구성된 회로를 통하여 전류가 흐르며 고장 시에는 병렬회로를 차단, Fuse를 통하여 고장전류를 차단한다. 복구 후 Fuse를 교체하여야 하고 예비품을 확보해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 수동적 소자인 한류 리액터를 위상별 발전모선에 적용하고 단락전류 및 지락전류의 변화와 그 결과를 나타내었다. 발전모선의 위상구성은 버스구조(Bus network), 성형구조(Star network), 환형구조(Ring network)등으로 분류하였으며 대칭구조의 발전모선을 구성하고 한류 리액터의 위치와 구성방식에 따라 계통 내에 미치는 영향을 고장전류를 통하여 그에 대한 장단점을 비교 분석한다.

2. 기존의 해양전력계통

고장전류 계산에 사용된 발전기 및 리액터의 정격은 Table 1과 같다. 발전기의 중성점은 직접접지 하였으며 발전전압 0.9kV의 2000kW 발전기 5대와 3개의 모선으로 가정하였다. 발전전원외의 고장전류 기여는 고려하지 않았으므로 케이블, 부하 등은 없는 것으로 가정하였다. 고장형태는 단락고장으로는 3상 단락, 2선 단락 등이며 지락고장은 1선 지락, 2선 지락 등에 대한 고장전류 결과를 비교하였다. Figure 1은 일반적인 경우의 계통구성이다. 1~2기의 발전기를 발전모선으로 구성되며 좌우 또는 상하 대칭 형태로 모선을 배치하고 각 모선 간을 전기적으로 연계하여 상호간 전력을 공유한 형태이다. 각 모선이 공통으로 연결되어 있으므로 전체 발전기의 단락전류가 흐르게 되어 모선의 단락용량이 매우 커지며 모선을 연결하는 케이블 등도 단락 전류 내량이 적합하여야 한다. 고장 시 큰 고장전류에 의해 고장검출 및 판단은 용이하나 보호시스템의 오류 등으로 인하여 차단설비 등이 오동작하거나 부동작할 경우에는 고장 구간의 격리가 이루어지지 않거나

Table 1: Equipment ratings

구분	정격
발전기	2000kW, PF=0.85, 0.69kV, FLA=1.969kA
한류 리액터	2kA, 0.69kV

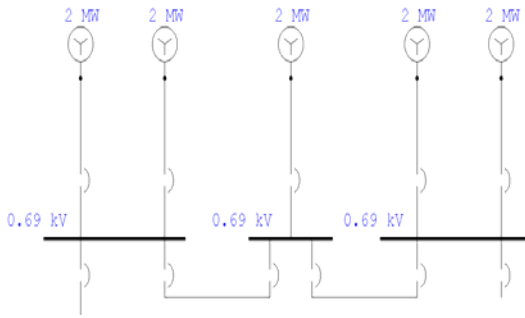


Figure 1: The configuration of typical generator

격리시간이 늦어지면 발전기의 정지(Shutdown) 또는 대정전(Blackout)을 피할 수 없다. 5기의 발전기에 의해 54.6kA의 3상 단락전류가 발생하고 발전기 1기당 기여분은 10.92kA이다. 그러므로 각 0.69kV 모선은 54.6kA이상의 단락용량을 구비하여야만 한다. 또한 상응하는 차단기, 케이블등도 Table 2와 같이 단락정격을 만족하여야만 한다.

Table 2: Fault currents(kA) without reactor

고장 구분	Center Bus(kA)	Side Bus(kA)	비 고
3상 단락	54.6		
L-G	68.4		$3I_0$
L-L-G	91.96		$3I_0$
L-L	47.2		상전류

3. 개선된 해양전력계통

3.1 고장전류와 리액터 임피던스

리액터의 고장전류 제한기능은 리액터스에 의한 것이므로 리액터의 임피던스가 커짐에 따라 제한되는 전류도 커질 수 밖에 없다. 고장전류를 제한하는데 있어서 임피던스의 증가는 긍정적이지만 그에 따라 전압강하도 커지므로 리액터의 임피던스는 적절한 크기가 되어야만 한다. Figure 2는 단일 발전기 모선에 리액터를

직렬 삽입하고 한류 리액터 임피던스 변화에 대한 고장전류 값을 계산하여 그래프로 나타낸 것이다. 리액터 임피던스가 커질수록 고장전류도 감소하지만 약 0.5Ω 이상에서는 고장전류 감소효과가 급격히 줄어들음을 알 수 있다. 그러므로 리액터 임피던스의 크기는 계통의 임피던스, 전압강하, 정격전류 등의 요소를 고려하여 고장전류의 제한값을 결정하고 재해석의 반복 수행에 의하여 결정하여야 할 것이다.

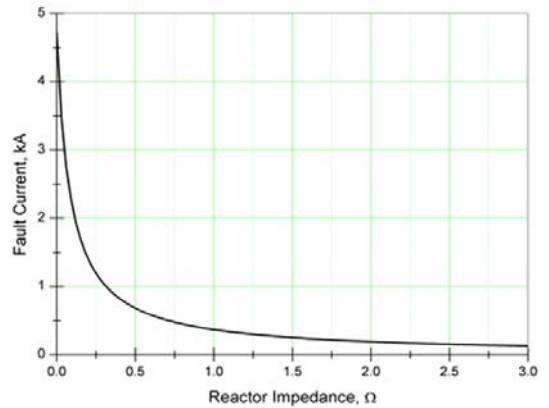


Figure 2: Fault current and reactor impedance

3.2 직결 모선(Bus network)

Figure 3과 같이 직결 모선은 발전기 출력단에 직렬로 한류 리액터를 삽입한 모선구성이다. 발전기 수량만큼의 리액터가 필요하며 리액터 이하는

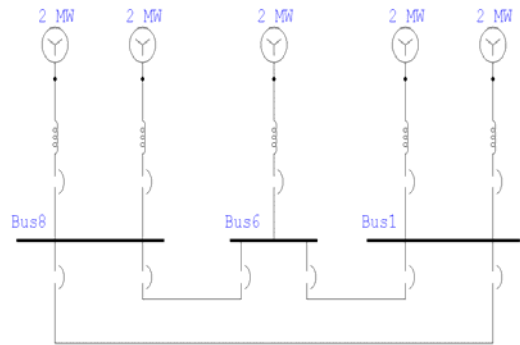


Figure 3: Bus network of generator with series reactor

일반적인 모선과 같은 구성이므로 특성은 동일하지만 각 발전기의 고장전류는 직렬 삽입된 리액터의 임피던스에 의하여 감소된 만큼의 고장전류가 각 모선에 흐르게 되므로 일반적인 모선보다는 작은 고장전류가 흐르게 된다. 또한 직결모선의 3상 단락전류는 43.3kA로서 발전기 1기당 기여분은 8.66kA로서 일반모선에 비하여 79.3% 정도이므로 각 모선, 차단기 및 케이블의 단락정격을 50kA이하로 **Table 3**과 같이 선정가능하다.

Table 3: Fault currents(kA) with series reactor

고장 구분	Center Bus(kA)	Side Bus(kA)	비 고
3상 단락	43.3		
L-G	51.58		$3I_0$
L-L-G	63.95		$3I_0$
L-L	37.47		상전류

3.3 환형 모선(Ring network)

환형 모선은 발전모선을 고리(Ring) 형태로 연결하며 모선 간에 한류 리액터를 직렬 삽입하여 **Figure 4**와 같이 구성한다. 전체적인 모선의 연결이 페루프 고리 형태(Ring connection)를 이루고 있으며 모선간 임피던스의 삽입에 의해 중앙 모선과 좌우측 모선의 고장전류 크기는 다르게 나타난다. 각각의 발전기는 모선에 직결되어 있으므로 발전기의 단락전류 기여분은 그대로 모선으로 전달된다. 그러나 모선간의 고장전류는 리액터의 임피던스에 의해 감소된다. **Table 4**와 같이 환형모선의 경우 필요한 리액터의 수는 발전기의 수와 관계없이 모선의 수와 동일하다. 3상 단락전류는 중앙과 좌우측 모선이 각각 39.8kA, 45.2kA로서 리액터에 의하여 모선간의 고장전류 영향이 감소됨을 보이고 있다. 그러므로 단락정격은 중앙모선은 40kA이하, 좌우측 모선은 50kA이하로 선정이 가능하므로 차단기 및 케이블 등 더 경제적 구성이 가능하다.

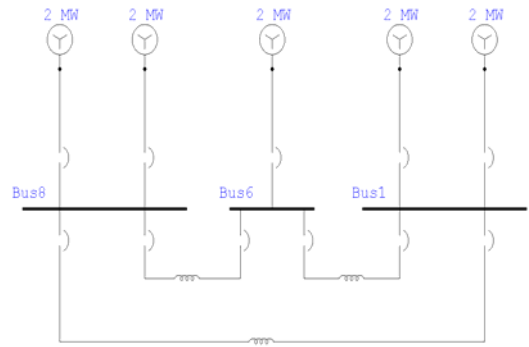


Figure 4: Ring network of generator

Table 4: Fault currents(kA) of ring network with reactor

고장 구분	Center Bus(kA)	Side Bus(kA)	비 고
3상 단락	39.6	45.2	
L-G	47.08	54.91	$3I_0$
L-L-G	58.16	70.26	$3I_0$
L-L	34.29	39.07	상전류

3.4 성형 모선(Star network)

Figure 5와 같이 성형 모선은 발전기 모선간에 공용모선을 두고 상호간에 리액터를 이용하여 연결

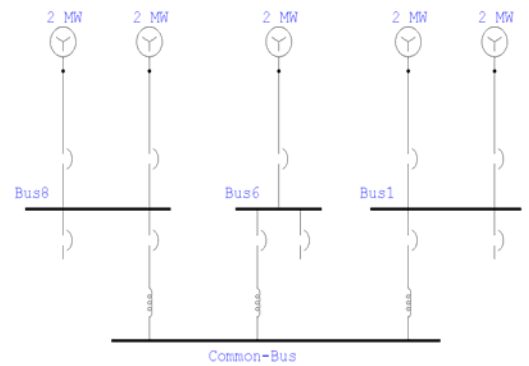


Figure 5: Star network of generator

하는 구성이다. 필요한 리액터의 수량은 모선의 수와 같으나 추가적으로 공용모선이 필요하며 모선간 연결이 Y형상(Star connection)을 이루고 있다. 환형모선에 비하여 추가적인 공용모선이 단점이지만 차단기 3대만으로 구성 가능한 것이 장점이다. 공용모선측은 LBS(Load break switch, 부하차단기) 등으로 대체도 가능하다. Table 5와 같이 3상 단락전류는 중앙모선 28kA, 좌우측모선 36.7kA로서 환형모선에 비하여 중앙모선은 70%, 좌우측 모선은 81% 정도로 감소되었다. 모선의 단락정격을 30kA 이하, 40kA 이하로 선정가능하게 됨으로 관련 설비 및 유지보수 비용 또한 감소될 것이다.

Table 5: Fault currents(kA) of star network with reactor

고장 구분	Center Bus(kA)	Side Bus(kA)	비 고
3상 단락	28.0	36.7	
L-G	32.78	44.34	$3I_0$
L-L-G	39.72	56.2	$3I_0$
L-L	24.19	31.74	상전류

4. 시뮬레이션 및 결과분석

Table 6은 모선위상에 따른 차단기 및 발전모선의 최소 단락정격과 차단기의 소요수량을 나타내었으며 단락전류 해석 결과를 바탕으로 최

Table 6: Fault ratings of circuit breaker and generator bus

Bus system	Generator Bus (kA)		Circuit Breaker
No reactor	≥55		6
Bus	≥45		6
Ring	≥40	≥46	6
Star	≥30	≥37	3

대 55kA, 최소 30kA로서 25kA 정도의 상당한 차이를 보이고 있다. 소요 차단기의 수량도 최대 6개와 최소 3개로서 50%의 수량차를 보이고 있다. 또한 Figure 6과 Table 7은 3상 단락전류의 결과를 리액터 없는 경우 대비 단위법(per unit)으로 나타내었으며 소요되는 리액터 수량과 고장전류 감소효과가 반드시 비례하지 않음을 보이고 있다. 성형모선과 환형모선 방식은 동일한 수량의 리액터를 사용하더라도 고장전류의 크기가 약 20% 이상 차이를 보이고 있다. 조선해양 분야의 전력계통 구성시에 고장전류의 모선간 영향을 감소시키고자 하는 경우 수동적 소자인 리액터의 구성방식에 따라 다양한 결과를 얻을 수 있음을 보이고 있다. 조선해양 분야의 전력계통도 고압화 추세이므로 모선간 고장전류 제한은 전체 계통의 안정성을 제고하는데 큰 영향을 미치고 있으며 SSFCL, HTSFCL 등은 높은 초기비용과 예비품 확보, 관리 인력 등

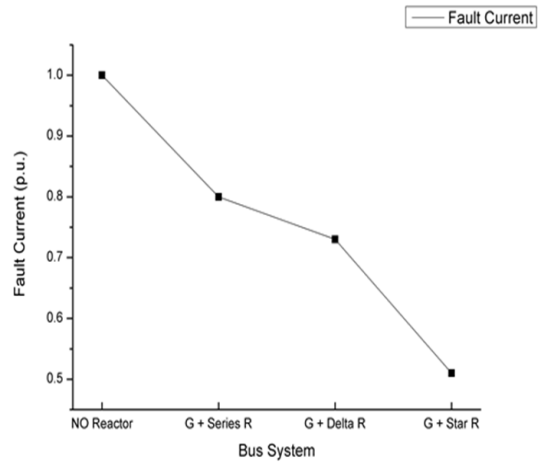


Figure 6: Fault currents(p.u.) and network topology

Table 7: Fault currents(p.u.) and reactors

Bus system	Center Bus(p.u.)	Side Bus(p.u.)	Reactors
No reactor	1.0		0
Bus	0.8		5
Ring	0.73	0.83	3
Star	0.51	0.67	3

추가적 비용이 필요하게 된다. 다른 설비에 비하여 한류 리액터는 설치 후 유지보수, 관리 비용 등에 대한 장점을 가지고 있다. 물론 계통 설계시 전압 안정도, 과도 안정도 등에 대한 세밀한 검토 또한 필요할 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 동일한 계통에 동일한 한류 리액터를 이용한 3가지 모선구성에 대한 고장 전류 크기를 모의실험, 비교하였다. 리액터가 없는 경우에 비해 리액터를 사용한 경우가 약 80~50% 정도의 고장전류 감소효과를 보였으며 동일한 용량, 동일한 수량의 리액터를 사용하더라도 위치나 수량에 따라 고장전류의 크기가 변화되었다. 또한 한류 리액터의 임피던스 크기는 효율적 경제적 임계점이 존재하므로 계통의 특성에 맞추어 선정되어야 한다. 리액터의 수량에 있어서는 한류 리액터의 수량과 고장전류 감소는 반드시 비례하지 않는다. 리액터의 구성은 모선간 리액터의 구성방식에 따라 고장전류의 감소량, 추가로 필요한 설비(차단기, 공용모선 등)에 차이가 있으며 이는 해당 계통의 안정성 등에 기초하여 결정되어야 할 것이다. 아울러 한류 리액터는 일부 모선의 고장에 의한 대정전(Blackout)을 막을 수 있는 효율적이며 가장 경제적인 방안이 될 수 있을 것이다.

후 기

본 과제(결과물)는 해양수산부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업 및 교육과학기술부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

[1] K. J. Jo, S. H. Ryu, H. S. Lee, and J. S. Oh, "The designed on electric power system for full electric propulsion warship," Proceedings of the Korean Society of Marine

Engineering Conference, pp. 224, 2012 (in Korean).

[2] C. H. Kim, Y. S. Kim, H. W. Jeong, S. N. Ryu, and K. K. Yoon, "Electric power system design and analysis for drilling rigs," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 7, pp. 942-947, 2012.

[3] H. W. Jeong, Y. S. Kim, C. H. Kim, S. H. Choi, and K. K. Yoon, "Analysis on application of flywheel energy storage system for offshore plants with dynamic positioning system," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 7, pp. 935-941, 2012.

[4] J. S. Kim, S. G. Oh, S. H. Kim, H. S. Kim, D. K. Kim, and K. K. Yoon, "A study on the performance analysis for power converters of electric propulsion ship," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 8, pp. 1278-1284, 2008 (in Korean). [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2008.32.8.1278>

[5] C. Y. Lee, K. Y. Yang, D. O. Yoon, and Y. R. Kwon, "Study of power system of floating production storage and offloading(FPSO) intended to voyage with thrusters between fields," Proceedings of the Korean Society of Marine Engineering Conference, pp. 47-48, 2012 (in Korean). [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.2.250>

[6] Y. H. Kim, H. W. Yang, J. Y. Choi, B. Y. Seok, K. H. Lee, and J. S. Hur, "Study on development of 345kV dry type current limiting reactor," Conference in Techno-Fair(The Korean institute of electrical engineers), pp. 14-17, 2013 (in Korean). [Online]. Available: http://www.kiee.or.kr/Publications/sub_01_7.asp